

**RECONSTRUCCIÓN DE COMPUTADOR ANALÓGICO DEL LABORATORIO DE
SISTEMAS DINÁMICOS Y CONTROL DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE
PEREIRA**

CAMILO CARDONA MARÍN
Código: 1087550351

DOUGLAS ALBERTO FORERO RIVERA
Código: 4519124

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA
PEREIRA
2020

**RECONSTRUCCIÓN DE COMPUTADOR ANALÓGICO DEL LABORATORIO DE
SISTEMAS DINÁMICOS Y CONTROL DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE
PEREIRA**

CAMILO CARDONA MARÍN
Código: 1087550351

DOUGLAS ALBERTO FORERO RIVERA
Código: 4519124

TRABAJO DE GRADO

I.M. - M.Sc. CARLOS ALBERTO MONTILLA M.

Director

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA
PEREIRA
2020

DEDICATORIA

Camilo Cardona Marín

Este trabajo de grado es dedicado a mis padres por su infinita paciencia y apoyo incondicional. También a aquellos compañeros que con el paso del tiempo se convirtieron en amigos haciendo parte del crecimiento tanto académico como personal.

Douglas Alberto Forero Rivera

Dedico a este trabajo de grado a mi madre, a mi abuela Helena Tenorio q. e. p. d. y a mi hermana Angélica.

AGRADECIMIENTOS

Camilo Cardona Marín

Agradezco al ingeniero Carlos Alberto Montilla por su guía y apoyo en la realización de este trabajo de grado.

Douglas Alberto Forero Rivera

Le doy gracias al Ing. Montilla por toda su colaboración, a mi esposa Helena por creer en mí y a Rolando Ramírez por su gran apoyo en la ejecución de este trabajo de grado.

CONTENIDO

DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	12
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
importancia	15
antecedentes	15
objetivos	26
Objetivo general	26
Objetivos específicos	26
alcances	26
limitaciones	26
metodología empleada	27
1. Descripción de mecanos y computadores analógicos mecánicos	28
1.1 MECANO	28
1.2 Computación analógica	30
1.2.1 Computadores Analógicos Mecánicos	32
1.2.2 Computadores Analógicos Eléctricos	35
1.2.3 Ordenadores Híbridos	37
2. Descripción del computador analógico mecánico a tratar [8]	41
2.1 OPERACIONES MATEMÁTICAS POSIBLES EN EL COMPUTADOR ANALÓGICO	42
2.1.1 Multiplicación Por una Constante	42
3. Diagnóstico del computador analógico e inventario de piezas rotas, defectuosas o faltantes	49
3.1 UNIDAD DE ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN	49
3.2 UNIDAD DE INTEGRACIÓN	50
3.3 SISTEMA DE GRAFICACIÓN X-Y	50
3.4 JUEGO DE POLEAS y correas	51

4. Descripción del proceso de fabricación y ensamble de piezas rotas, defectuosas o faltantes.	53
5. Pruebas de funcionamiento y análisis de los resultados.	70
6. Elaboración del Manual de prácticas del computador analógico mecánico, puesta a prueba y correcciones.	74
6.1 PROBLEMA FUNCIÓN ENTRADA PASO.....	74
6.2 PROBLEMA SOBRE CAÍDA LIBRE	78
6.3 PROBLEMA DE VIBRACION CON AMORTIGUACION VISCOSA.....	84
7. Resultados, Conclusiones y Recomendaciones.....	92
7.1 resultados	92
7.2 conclusiones	92
7.3 recomendaciones	93
8. Bibliografía.....	94
9. ANEXOS.....	97
Anexo A. planos de ensambles en placas de acrilico	97
Anexo b. planos de piezas logradas por impresion 3D	123
Anexo c. planos de piezas fabricadas por procesos de mecanizado	140

LISTA DE FIGURAS

Figura	1.	Abaco	Chino	
				12
Figura	2.	Mecanismo	de	Anticítera
				13
Figura	3.	Inversor		aprafuliense
				14
Figura	4.	Compuerta	OR	aprafuliense
				14
Figura	5.	Compuerta	AND	aprafuliense
				15
Figura	6.	Biestable	aprafuliense (elemento de memoria)	
				15
Figura	7.			Calculadora
Pascalina.....				16
Figura	8.	Máquina	diferencial	de
Babbage.....				18
Figura	9.	Computador analógico soviético IPT-4, desarrollado en la industria		
				20
Figura	10.	Tabla	de la máquina	de Turing
				21
Figura	11.	Imagen	del Computador	Analógico
				22
Figura	12.	Mecano	del Laboratorio	De
Modelos.....				26
Figura	13.	Mecano Para El Análisis De Mecanismos De Cuatro Barras y Combinaciones..		
				27
Figura	14.	Prototipo	del Analizador Diferencial	de Vannevar Bush
				30

Figura	15.	Soportes	de	memoria	.....31
Figura	16.	El	Ordenador	Mecano	.....31
Figura	17.	Árbol	de	juego	.....32
Figura	18.	The	GP-6	Analog	Computer.....33
Figura	19.	Gp-10 and Gp-10s			.....34
Figura	20.	Primera	computadora	analógica	comercial REAC.....35
Figura	21.	Layout	de	TRIDAC	.....37
Figura	22.	Esquema del Computador Analógico			.....38
Figura	23.	Esquema de mecanismo	multiplicador	por banda y poleas	.....38
Figura	24.	Esquema de mecanismo	diferencial	para adición y sustracción	.....40
Figura	25.	Ensamblaje de mecanismo	diferencial	para adición y sustracción del computador analógico	.....41
Figura	26.	Cadena cinemática de unidad de adición y sustracción			.....41
Figura	27.	Esquema de mecanismo para procesos de integración			.....42
Figura	28.	Configuración del mecanismo para procesos de integración del computador analógico			.....44
Figura	29.	Cadena cinemática de la unidad de integración			.....44
Figura	30.	Esquema dispositivo graficador			.....45
Figura	31.	Cadena cinemática del sistema de graficación			.....45
Figura	32.	Esquema placa base			.....50
Figura	33.	Imagen placa base en formato .dxf			.....51

Figura	34.	Vinilo	sobre	placa	base	de	acrílico	
								52
Figura	35.		Soporte	ejes	de	entrada	X	
integrador.....								52
Figura	36.		Sujetador		de		paneles	
								53
Figura 37. Ensamble de soportes y bastidores.....								54
Figura 38. Condición inicial del graficador.....								55
Figura 39. Esquema y listado de partes del mecanismo graficador								55
Figura 40. Detalle de placa base del graficador, la mesa y el carro porta-pluma								56
Figura	41.		Preensamble		carros		porta-pluma	
								57
Figura	42.		Impresora	3D		Objet	24	
								58

Figura 43. Impresión de piezas con material de soporte	59
Figura 44. Remoción de material de soporte	59
Figura 44. Piezas sin material de soporte	60
Figura 45. Esquema y listado de partes sistema sumador	60
Figura 46. Preensamble sistema sumador	61
Figura 47. Proceso de torneado de topes	61
Figura 48. Información de componentes	62
Figura 49. Esquema y listado de piezas sistema integrador	63
Figura 50. Tornillos de 1/2-24UNF recuperados	64
Figura 51. Esquema placa de integrador	64
Figura 52. Componentes placa integrador	65
Figura 53. Ensamble parcial frontal	65
Figura 54. Ensamble parcial superior	66
Figura 55. Ensamble final	66
Figura 56. Comparativo resultados vibración con amortiguación viscosa	68
Figura 57. Comparativo resultados problema sobre caída libre	69

Figura	58.	Comparativo	resultados	función	entrada	paso	
							70
Figura	59.	Diagrama	esquemático	función	entrada	paso	
							71
Figura	60.	Distribución	de correas y poleas	función	entrada	paso	
							72
Figura	61.		Plano	de	montaje		1
							73
Figura	62.		Plano	de	montaje		2
							73
Figura	63.	Montaje	de correas	y	poleas		
							74
Figura	64.	Grafica	obtenida	función	entrada	paso	
							75
Figura	65.	Diagrama	esquemático		caída	libre	
							76
Figura	66.	Distribución	de correas y poleas		caída	libre	
							77
Figura	67.		Plano	de	montaje		1
							78
Figura	68.		Plano	de	montaje		2
							78

Figura 69.	Montaje de correas y poleas	79
Figura 70.	Grafica obtenida caída libre	80
Figura 71.	Esquema de vibración con amortiguación viscosa	81
Figura 72.	Diagrama esquema de vibración con amortiguación viscosa	82
Figura 73.	Distribución de correas y poleas vibración con amortiguación viscosa	82
Figura 74.	Plano de montaje 1	83
Figura 75.	Plano de montaje 2	84
Figura 76.	Plano de montaje 3	84
Figura 77.	Montaje de correas y poleas	85
Figura 78.	Grafica obtenida vibración con amortiguación viscosa	86

LISTA DE TABLAS

Tabla	1.	Unidad de adición y sustracción	46
Tabla	2.	Unidad de integración	47
Tabla Y	3.	Sistema de graficación X-	48
Tabla	4.	Juego de poleas	49
Tabla	5.	Juego de correas	49

RESUMEN

En el Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control de la Universidad Tecnológica de Pereira, se contaba con un computador analógico mecánico no apto para el uso ya que presentaba elementos faltantes y averiados. Este dispositivo fue construido por los estudiantes de Ingeniería Mecánica Fernando Hoyos Gutiérrez y León Duque Orrego en el año de 1976. El computador se usó durante aproximadamente 10 años, momento en el cual presentó diferentes averías y no fue rehabilitado.

El objetivo general de este proyecto fue reconstruir el computador analógico mecánico del Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control de la Universidad Tecnológica de Pereira y elaborar el manual de prácticas respectivo. Para ello, inicialmente se realizó una revisión bibliográfica sobre mecanos y computadores analógicos mecánicos para entender su funcionamiento y usos, seguidamente se hizo un inventario de piezas faltantes, rotas y defectuosas para así lograr un diagnóstico del estado del computador analógico y proceder a la fabricación e instalación de dichas piezas y finalmente se ejecutaron pruebas de su funcionamiento a partir del documento original del mecano.

Como criterio adicional, del documento original del Computador Analógico Mecánico se tomaron como patrones en función de validación, los resultados y las gráficas generadas por el análisis de sistemas de primer y segundo orden, obtenidos inicialmente en el año de 1976 (momento del cual se tuvo certeza de las condiciones operacionales del ejemplar) a partir de los problemas y procedimientos propuestos por sus fabricantes, para así efectuar la confrontación de los datos, determinando de esta manera la fiabilidad de los resultados arrojados por el dispositivo en cuestión.

La reconstrucción del computador analógico mecánico del Laboratorio De Sistemas Dinámicos y Control se realizó en la en las instalaciones de la escuela de Tecnología Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

La finalidad de este proyecto fue la rehabilitación del computador analógico mecánico, se espera que se pueda aprovechar como material de apoyo didáctico para la enseñanza de diversos tópicos de Mecánica de maquinaria, Instrumentación y control y en la validación de modelos matemáticos de sistemas mecánicos y en cursos de Teoría de control.

La reconstrucción del computador analógico mecánico culmina exitosamente con un equipo apto para su uso, en donde se sustenta una metodología más completa y clara respecto a su programación, operación y obtención de resultados puesto que se usó una tecnología de fabricación más precisa, es decir corte laser, corte por *plotter* 2D e impresión 3D en comparación con los métodos artesanales dispuestos en la fabricación del computador analógico original, lo que significa una mejora en el equipo en cuanto a precisión, estandarización de piezas y operación.

INTRODUCCIÓN

IMPORTANCIA

Actualmente, en la Universidad Tecnológica de Pereira se disponen de algunas herramientas didácticas de apoyo para la enseñanza de los cursos de Mecánica de Maquinaria e Instrumentación y control, como lo son algunos mecanos, los cuales fueron concebidos para la ilustración del funcionamiento de transmisiones mecánicas básicas, pero no existe una herramienta didáctica de utilidad efectiva que permita la aprehensión de los principios de funcionamiento y operación de la computación en sus primeras manifestaciones, como lo es el computador analógico mecánico, objeto del presente proyecto el cual integra sistemas mecánicos con ecuaciones integro-diferenciales, convirtiéndose en un sistema de alta complejidad.

ANTECEDENTES

El ábaco mostrado en la figura 1, es considerado la primera máquina de calcular. Algunos investigadores e historiadores consideran que tiene origen en Babilonia hacia el año 600 a.C. aunque otros datan su natividad en China, entre los años 3000 a.C. y 500 a.C. pero de lo que sí se tiene certeza es que hay evidencia de su presencia a partir del año 500 a.C. en algunos textos griegos, además, se han encontrado restos arqueológicos que coinciden con ábacos usados en tiempos romanos, donde jugó un papel muy importante en las transacciones comerciales, ya que el ábaco era una herramienta de uso habitual entre los mercaderes de Asia y Europa, sin embargo, la aplicación progresiva de los números indo-árabes (los que se utilizan actualmente), fue causal de que en Europa se dejará de usar el ábaco de manera notoria a partir del siglo XVIII. No obstante, en China y Corea continúa vigente [1].

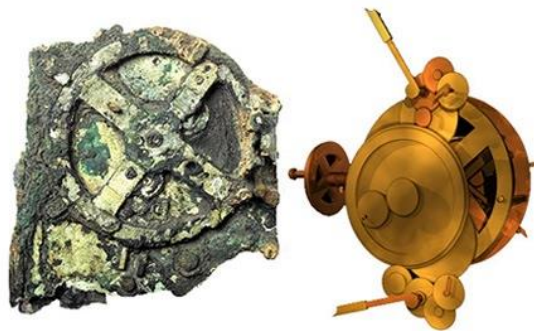
Figura 1. Abaco Chino



Fuente: http://spanish.china.org.cn/photos/txt/2010-06/30/content_20385271.htm

En 1901 un grupo de buscadores de esponjas rescató un trozo de bronce corroído, entre los restos de una galera romana, que naufragó aproximadamente en el año 70 a.C. frente a la isla griega de Anticítera. En un principio se creyó que el artefacto era una de los primeros relojes mecánicos de la historia, sin embargo, se habla de uno de los hallazgos más importantes alguna vez hecho por la humanidad, pues se trata del primer computador analógico mecánico atribuido al matemático griego Arquímedes, llamado “el Mecanismo de Anticítera”, el cual se muestra en la figura 2, que data entre los años 150 a.C. y el 100 a.C., éste instrumento, a partir de un complejo sistema de ruedas dentadas, representaba el universo como los científicos griegos lo entendieron, pudiendo mostrar la posición de algunos planetas como Marte y Venus, además seguía el movimiento lunar prediciendo eclipses y el color que éstos tendrían al momento del hecho. Algunos creen que posiblemente pudo haber sido utilizado para la planificación de tareas agrícolas, conocer los lapsos de festivales religiosos y para saber cuándo ir a la guerra o viajar de noche [2].

Figura 2. Mecanismo de Anticítera



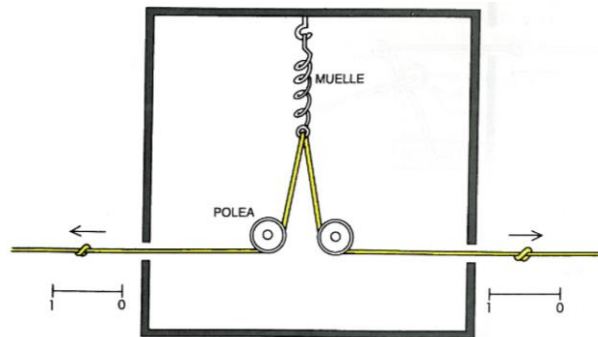
Fuente: <http://oplanetaehnosso.blogspot.com/2010/12/o-mecanismo-de-anticitera.html>

En la isla de Apraful, a pocos kilómetros de la costa noroeste de Nueva Guinea, los arqueólogos descubrieron los restos de un aparejo de cuerdas y poleas que, según se cree, debe haber establecido el primer ordenador digital. En una minuciosa inspección de un

yacimiento que se extiende a lo largo de varios kilómetros, en una región situada al este de los Montes Tomapelo, la expedición descubrió vestigios semienterrados de fibra de yute. Observaron y anotaron la posición de una serie de poleas de bronce, muy corroídas, y de diversos artilugios relacionados a ellas. El director de los trabajos de excavación, *Robert L. Ripley*, del *Charles Fort Collage*, de *New York*, fecha su elaboración hacia el 850 después de Cristo [3].

Uno de los dispositivos empleados por los aprafulios, convertía los 1 en 0 y recíprocamente los 0 en 1. Este dispositivo, mostrado en la figura 3, similar a un inversor, consistía en una caja en la que se habían perforado orificios por sus caras anterior y posterior [3].

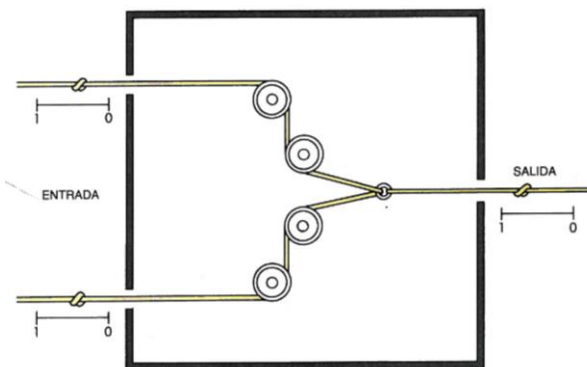
Figura 3. Inversor aprafuliense



Fuente: [3].

En otro dispositivo, la caja tenía dos cuerdas de entrada de señal. Cuando al menos una de ellas se encontraba en la posición 1, la única cuerda correspondiente a la señal de salida se encontraba también en posición 1 tal como se muestra en la figura 4. Se trata entonces de un dispositivo similar al denominado compuerta OR [3].

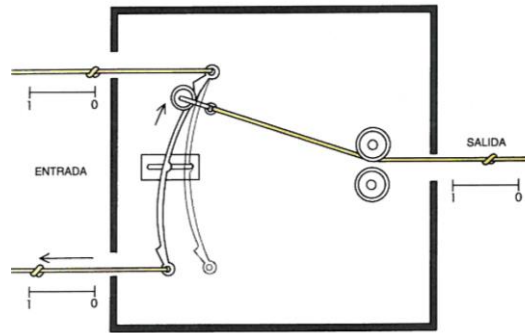
Figura 4. Compuerta OR aprafuliense



Fuente: [3].

En otro dispositivo, Los aprafulios construyeron lo que hoy llamaríamos una compuerta *AND*, mediante tres poleas y una varilla curva ilustradas en la figura 5. La polea unida a una cuerda de salida, se dirigía hacia el extremo de la rodadera de cuya cuerda no se tensionó, es decir posición 0. La sogá de salida solo avanzara hasta la posición 1 cuando se tira de manera simultánea de ambas cuerdas [3].

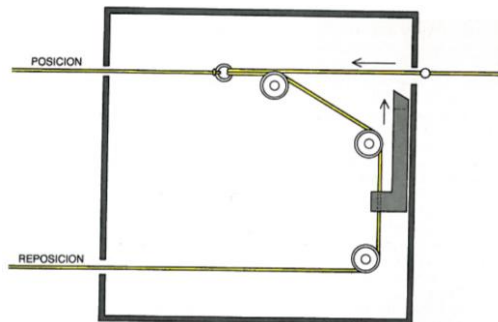
Figura 5. Compuerta AND aprafuliense



Fuente: [3].

La memoria del computador de Apraful, radica en centenares de elementos especiales de almacenamiento llamamos biestables, o flip-flops, apreciable uno de dichos elementos en la figura 6. La cuerda de salida, que es prolongación física de la posición, lleva un grueso retén que se engancha en una muesca tallada en el resbalón. Al tirar, de la cuerda posición, el retén cabalga sobre la cuña del resbalón y cuando la cuerda llega al final de su recorrido, se encaja en la muesca. En consecuencia, la cuerda de salida queda bloqueada en esa posición hasta que el ordenador altera la situación jalando de la cuerda reposición. Al tirar de ella, el resbalón se desliza hasta liberarse el retén, lo que permite que la cuerda de salida retorne al valor 0. A partir de ese punto, el valor que “recuerda” el biestable es 0 [3].

Figura 6. Biestable aprafuliense (elemento de memoria)



Fuente: [3].

Antiguamente, los cálculos que se necesitaban realizar para trazar las rutas y las posiciones de los barcos que surcaban mar abierto entre América y Europa, eran bastante

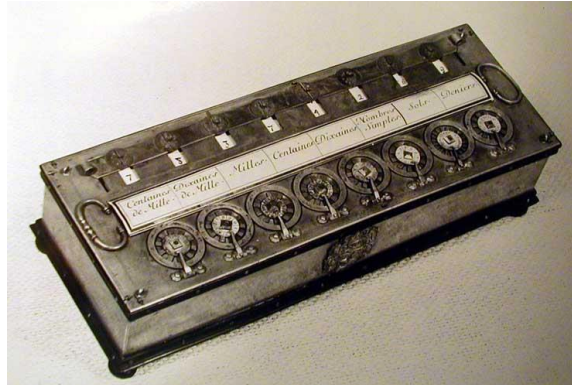
complicados, lo que originó la aparición de los llamados instrumentos analógicos (aquellos que entregaban de forma rápida una respuesta muy próxima al resultado exacto), entre ellos el más sencillo era la Regla de Cálculo, que era un computador analógico manual que utilizaba los logaritmos, los cuales fueron inventados y nombrados números artificiales hacia el año de 1600 por el matemático británico *John Napier* (Neper), como fundamento para dichos dispositivos multiplicadores de números [1].

La primera Regla de Cálculo fue inventada en el año de 1623 por el matemático inglés *William Oughtred*, quien colocó dos filas de *Edmund Günter* (Fila que llevaba los logaritmos escritos en una escala lineal) que se deslizaban una entre sí, aunque fue el matemático suizo *Leonard Euler* quien popularizó su uso. Consecutivamente, se realizaron algunas modificaciones dando como resultado reglas de cálculo de diferentes tipos, como por ejemplo las circulares. Su máxima utilización se dio entre los años 50 del siglo XIX hasta los años 70 del siglo XX, tiempo en el que fueron sustituidas por las calculadoras electrónicas [1].

Los primeros mecanismos de cálculo obedecían a las competencias de la persona que ejecutaba los cálculos para que el resultado obtenido fuese lo más aproximado posible, por esta razón aparecieron los mecanismos de engranajes o ruedas dentadas, que mostraban los resultados sin estar supeditados de las capacidades del operador. El primero de ellos fue el Reloj Calculante, creado por el matemático alemán *Wilhelm Schickard* en 1623. Este instrumento se basaba en el dinamismo de seis ruedas dentadas que se engranaban en otra rueda que, por cada giro completo de una de las ruedas, la rueda situada a la derecha daba un décimo de vuelta. El Reloj Calculante era un mecanismo que permitía sumar, restar, multiplicar y dividir números hasta de 6 dígitos y disponía de una campanilla que se activaba cuando se producían fallos o errores por desbordamiento, esto cuando el valor obtenido tenía más de seis dígitos [1].

Para el año de 1642 el matemático, físico y filósofo francés *Blaise Pascal* inventó un artefacto fácil transportar al que llamó la *Pascalina* ilustrada en la figura 7. Era de funcionamiento mecánico y realizaba las operaciones de suma y resta. El motivante de este invento para *Pascal* fue el de ayudar a su padre en su trabajo cotidiano, ya que era cobrador de impuestos en *Normandía* [1].

Figura 7. Calculadora Pascalina



Fuente: <http://www.computermuseum.li/Testpage/Pascaline-Calculator-1642.htm>

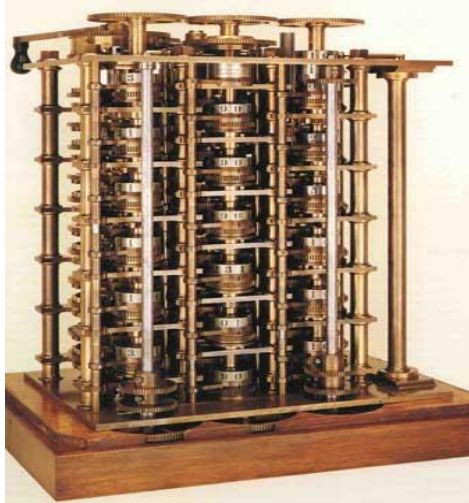
La Pascalina es considerada como la primera máquina sumadora de la historia. Aunque fue un dispositivo lo bastante fiable como para comercializarse, no obtuvo toda la gloria que anhelaba su creador. De igual manera que el Reloj Calculante, la *Pascalina* era un mecanismo que empleaba ruedas dentadas para efectuar las operaciones de cálculo. Por esto y otros importantes aportes en la construcción de calculadoras mecánicas, *Blaise Pascal* es reconocido como el padre de la computación de manera adyacente a *Charles Babbage* [1].

Las limitantes de cálculo que presentaba la *Pascalina* fueron solucionadas por la máquina de calcular del filósofo y matemático alemán *Gottfried Wilhelm Von Leibniz*. En 1673, su artilugio fue expuesto en la *Royal Society* de Londres. *Leibniz* se basó en la *Pascalina* para diseñarla, integrando diversas innovaciones mecánicas como el Tambor de Dientes Desiguales, que posibilitaba la multiplicación de un número por medio de la repetición de revoluciones en la manivela primaria. A parte de sumar y restar, también podía multiplicar, dividir y calcular raíces cuadradas. Sin embargo, presentaba problemas con la fiabilidad en los resultados, los cuales disminuyeron su versatilidad y por consiguiente su valor monetario. Otro aporte destacado de *Leibniz* al florecimiento de la computación fue el descubrimiento del sistema binario, que ahora es la base fundamental de todas las computadoras actuales [1].

Para el año de 1822 el matemático y también inventor británico *Charles Babbage* mostró en la *Royal Astronomical Society*, el esbozo de una máquina de diferencias mecánicas, llamada Máquina Diferencial (Figura 8.), diseñada para solucionar polinomios usando un método numérico llamado método de las diferencias. El colectivo avaló su proyecto pero éste nunca fue terminada por dos razones: la primera fue que la fricción entre los engranajes internos generaban vibraciones y la segunda, *Charles Babbage* modificaba su diseño constantemente. Entre 1833 y 1842, su trabajo se enfocó en el diseño de una máquina que se pudiera programar para hacer distintos cálculos, no sólo de funciones polinómicas o de tablas logarítmicas, sino también que lograra calcular funciones analíticas. Para éste proyecto *Charles Babbage* se basó en el telar de *Joseph Marie*

Jacquard [1], quien hacia 1800 se interesó en la invención y creó el telar de Jacquard. Este telar era mecánico y disponía de tarjetas perforadas en cartón. El concepto era que el telar obedeciera las instrucciones del cartón para realizar variedad de tejidos [4]. Al dispositivo que diseñó Babbage se le conoce como la máquina analítica, la que muchos consideran la primera computadora del mundo [1].

Figura 8. Máquina diferencial de *Babbage*



Fuente: <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/babbage.htm>

La matemática británica y socia de Babbage, *Lady Augusta Ada Byron* concibió para esta máquina analítica, diversos programas que pudiesen calcular valores de números como los de Bernoulli y operaciones de tipo trigonométricas. De igual manera que la máquina diferencial, la máquina analítica exhibió problemas de vibraciones que entorpecieron su total construcción [1].

Pensada en 1837 y creada en 1853, “La Máquina De Cálculo De *Scheutz*”, era un modelo mejorado de la máquina diferencial de *Charles Babbage*. El abogado e inventor sueco *Per George Scheutz*, con la colaboración de su hijo *Edvard Raphael Scheutz*, creó esta máquina, que fue posteriormente presentada en la feria mundial de París de 1855 donde se le otorgó la medalla de oro. En 1859 la máquina fue vendida al gobierno británico y en 1860 se genera otra máquina que se vendió a los Estados Unidos. Estas máquinas se utilizaron para crear tablas logarítmicas, pero no eran del todo perfectas, pues no podían producir tablas completas y fue *Martin Wiberg* quien rediseñó la máquina de cálculo de *Scheutz* en su totalidad y en 1875 creó un dispositivo consistente que imprimía las tablas logarítmicas completas [1].

Para cuando el profesor *Vannevar Bush* del *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* le comunica al mundo, en 1931, sobre la existencia de una nueva máquina en proceso de construcción, para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODES), el criterio del

analizador diferencial ya había sido publicado en el año de 1876 por Sir *William Thomson* (quien posteriormente se transfigura en *Lord Kelvin*), para ese tiempo, *Lord Kelvin* y su hermano mayor, *James Thomson*, lograron una simpatía en cuanto a la construcción de una sucesión de artificiosos mecanismos para resolver problemas matemáticos con el fin de analizar y sintetizar el movimiento armónico, este dispositivo fue nombrado "analizador diferencial" por *Waldo Lyon*, un poco más de medio siglo después de la publicación de Kelvin. Este mecano fue entonces el resultado de seis años de trabajo realizado por Bush y sus colaboradores, entre los que destacan *Herbert Stewart*, *Harold Hazen*, y *Samuel Caldwell*. Sin embargo, Kelvin no logró construir tal analizador diferencial, no por la ausencia de mecanizado de precisión en su época, sino porque, de igual manera que *Charles Babbage*, no tuvo en cuenta la importancia del aislamiento entre los componentes mediante el uso de amplificadores de potencia. Así entonces, fue precisamente la contribución esencial de Bush y su equipo, quienes aseguraron tres décadas de la supremacía analógica científica y de computación ingenieril, que sólo fue terminada por el impacto de los circuitos integrados y software orientado al usuario sobre la computación digital [5].

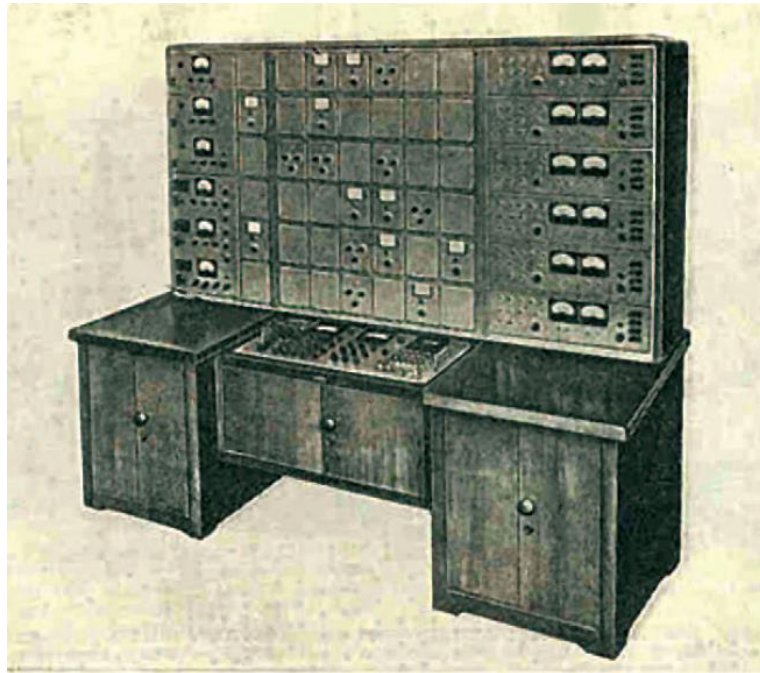
Una aplicación de los computadores analógicos, tuvo lugar en la artillería naval de la primera guerra mundial y fue allí en el año de 1920, donde evolucionó a pasos agigantados en respuesta a la amenaza militar substancial de las aeronaves de la época, demostrado en los últimos años de dicha guerra. El desarrollo en la segunda guerra mundial fue relativamente rápido en respuesta a las muy mejoradas capacidades de las nuevas aeronaves. Después de la segunda guerra, los diseños de los computadores analógicos mecánicos permanecieron en servicio militar activo hasta el año de 1970 y luego fueron hibridados con otros dispositivos análogo-eléctricos, que entre los años de 1950 y 1960 era la configuración preponderante de la computación militar que se enfatizaba principalmente en el rendimiento, produciendo una metamorfosis paulatina hacia los dispositivos digitales de computación electrónica de ese tiempo. Los complejos aparatos mecánicos de cómputo analógico jugaron un papel muy importante en la segunda guerra mundial, particularmente para el control de fuego de los cañones y otras armas de plataformas móviles que disparaban en contra de blancos también en movimiento, tales dispositivos lograron un muy alto grado de sofisticación bajo la vehemencia combinada de la complejidad matemática de los problemas de artillería y la necesidad de soluciones en tiempo real [6].

Los primeros días de la simulación de sistemas dinámicos fueron dominados por los ordenadores analógicos. En la Unión Soviética, las computadoras analógicas electrónicas se desarrollaron tanto en la Academia como en la industria [5].

El ordenador analógico electrónico original que se desarrolló exhibido en la figura 9, fue capaz de resolver ecuaciones diferenciales lineales sexto orden con coeficientes variables en el tiempo en tiempo real. Esto permitió la parte simulada de un sistema de control pudiese ser conectada directamente a la parte de *hardware* del sistema de control real que tenía que ser ajustado y probado. Utilizando amplificadores operacionales de alta ganancia de corriente continua, con profunda retroalimentación negativa construido sobre tubos y elementos de circuito lineal pasivos, se logró formar elementos lineales básicos tales como: integradores, elementos de suma, entre otros. Se utilizó además potenciómetros controlados por servomecanismos especiales para introducir los coeficientes variables en el

tiempo en la configuración del ordenador analógico (el modelo matemático de la parte del sistema general de control) [5].

Figura 9. Computador analógico soviético IPT-4, desarrollado en la industria



Fuente: [5].

El matemático inglés *Alan Mathison Turing* (1912-1953) publicó en 1937, un artículo sobre los Números Calculables, en este artículo, se introdujo la máquina de *Turing*, una entidad matemática abstracta que precisó el concepto de algoritmo y término siendo la predecesora de las computadoras digitales. Con la asistencia de su máquina, *Turing* demostró que existen problemas irresolubles, tales que ninguna máquina de *Turing* y por ende ningún ordenador será capaz de obtener su solución [7].

La máquina de *Turing* puede considerarse como una cinta infinita dividida en casillas, en la cual cada casilla contiene un símbolo. Sobre esta cinta opera un dispositivo que puede adoptar diversos estados y que, en cada instante, lee el símbolo de la casilla sobre la que se encuentra. En función del símbolo que ha leído y del estado en que se encuentra, puede realizar las siguientes acciones: pasar a un nuevo estado, imprimir un símbolo en lugar del que acaba de leer, desplazarse una posición hacia la izquierda o derecha, o bien detenerse [7].

El funcionamiento de una máquina de *Turing* puede ser representado a través de una tabla de doble entrada exhibida en la figura 10. Las filas están encabezadas por los estados, las columnas por los símbolos escritos en la cinta. En cada posición de la tabla puede

encontrarse casillas en blanco o tres elementos, ya sea el estado siguiente, el símbolo que se imprime en la cinta y/o el movimiento de la cabeza [7].

Figura 10. Tabla de la máquina de *Turing*

	1	0	b
p	q0D	p0I	rbD
q	q1D	q0D	p0I
r		r1D	sbP
s			

Fuente: [7].

En esta máquina de *Turing* particularmente, podemos encontrar casillas de la cinta con tres símbolos: 0, 1, o b, el cual representa una casilla en blanco. Examinando la tabla, se nota que los estados de esta máquina corresponden a las siguientes acciones [7]:

Estado **p**: mientras localiza el símbolo **0**, lo ignora y se desplaza hacia la izquierda. En cuanto lee el símbolo **1**, lo sustituye por **0**, pasa al estado **q** y se desplaza hacia la derecha. Si encuentra una casilla en blanco, pasa al estado **r** y se desplaza hacia la derecha [7].

Estado **q**: en tanto encuentra los símbolos **0** y **1**, los ignora y se desplaza hacia la derecha. En cuanto lee una casilla en blanco, imprime un cero, pasa al estado **p** y avanza hacia la izquierda. Su función, por tanto, es añadir un **0** al final de la cadena de ceros y unos, sobre la primera casilla en blanco situada a la derecha de la misma [7].

Estado **r**: en tanto localiza el **0**, lo sustituye por **1** y se desplaza hacia la derecha. En cuanto lee una casilla en blanco, pasa al estado final y la máquina se detiene [7].

Al inicio, la máquina se encuentra en el estado **p**, n casillas consecutivas de la cinta de entrada contienen un uno, las restantes están en blanco, y la cabeza lectora indica al último uno. Cuando la máquina se detenga, la cinta contendrá 2n unos. De cierta manera, esta máquina de Turing multiplica por dos [7].

La máquina de *Turing* es considerada computacionalmente completa, es decir, que puede resolver cualquier problema recursivamente numerable, lo cual equivale a un problema resoluble por un ordenador digital [7].

En la Universidad Tecnológica de Pereira, para el año de 1976 los estudiantes de Ingeniería Mecánica Fernando Hoyos Gutiérrez y León Duque Orrego, fabricaron un computador analógico mecánico con la finalidad de evaluar el funcionamiento de los mecanismos de cálculo y también con el propósito de simular el comportamiento transitorio de los sistemas de control de primer y segundo orden, ante entradas de paso y rampa. Este dispositivo integra sistemas mecánicos con ecuaciones integro-diferenciales, convirtiéndose en un sistema de alta complejidad [8]. La Figura 11 exhibe el estado actual de dicho dispositivo. No está operativo puesto que presenta elementos faltantes y averiados.

Figura 11. Imagen del Computador Analógico



Fuente: autores

Si bien, la computación analógica no sustenta un alto nivel de popularidad, en la actualidad se fabrican equipos analógicos y aún se realiza investigación dirigida hacia la computación analógica. La empresa *Comdyna*, presidida y fundada por *Ray Spiess* en el año de 1968, ubicada en *Barrington, Illinois U.S.A.*, fabrica actualmente ordenadores analógicos, en los que se encuentran: multiplicadores/ divisores, amplificadores operacionales, indicadores de sobrecarga, potenciómetros de condición inicial, interruptores de alimentación entre otros [9].

En la Universidad de *Harvard*, más precisamente en *Harvard Robotics Laboratory*, el cálculo análogo es uno de sus temas de investigación, puesto que muestran interés en la descripción de entrada y salida de sistemas gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias, que por su naturaleza robusta logran ejecutar operaciones de tipo aritméticas o lógicas [10, 11].

En la Escuela de Informática y Computación de la Universidad de *Indiana*, el profesor *Jonathan W. Mills*, ha enfocado su investigación al desarrollo de un híbrido análogo-digital o Súper Computador EAC (*Extended Analog Computer*), con el que pretende predecir el plegamiento estructural de las proteínas, proporcionar soluciones analógicas a cuestionamientos de tipo cuántico, entre otros [10, 12].

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Reconstruir el computador analógico mecánico del Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control de la Universidad Tecnológica de Pereira y elaborar el manual de prácticas respectivo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la revisión bibliográfica sobre mecatrónica y computadores analógicos mecánicos para entender su funcionamiento y usos.
- Realizar el inventario de piezas faltantes, rotas, defectuosas y diagnosticar el estado actual del computador analógico.
- Fabricar e instalar piezas faltantes, rotas o defectuosas.
- Ejecutar pruebas de funcionamiento a partir del documento original del mecatrónico
- Elaborar el manual de prácticas del computador analógico mecánico.
- Realizar el informe final y divulgar resultados.

ALCANCES

Este proyecto tuvo como alcance la recuperación y actualización del computador analógico mecánico a tratar, documentación e investigación bibliográfica y elaboración de un manual de prácticas.

Se implementó el uso de máquinas herramientas como torno convencional y centro de mecanizado CNC, software de diseño CAD donde se integran elementos 2D y 3D en un mismo escenario virtual, impresión 3D, corte 2D por plotter y láser.

LIMITACIONES

La realización de este proyecto estuvo limitada por el documento original del computador ya que faltó información de algunos elementos para poder fabricarlos. Esto se resolvió haciendo mediciones de las piezas y realizando una comparación entre cálculos requeridos y las piezas que se encontraron físicamente.

Discrepancias entre lo real y lo descrito en el documento en cuanto a programación y operación del equipo, las cuales fueron resueltas mediante el análisis y el desarrollo de las diferentes prácticas.

METODOLOGÍA EMPLEADA

Este trabajo se enmarca dentro del tipo de investigación Científica y tecnológica debido a que se utilizó teoría de máquinas para recuperar un equipo que tiene aplicación tecnológica.

En este proyecto, se establecen los siguientes pasos y satisfacer el objetivo propuesto:

- Búsqueda bibliográfica en bancos virtuales y en la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Basado el documento original del computador analógico mecánico, realizar un inventario de piezas y posteriormente un diagnóstico del estado actual del equipo.
- De acuerdo al diagnóstico, fabricar y ensamblar las piezas que requieran ser reemplazadas o repuestas.
- Evaluar el funcionamiento de los mecanismos de cálculo, ajustes de ser necesarios y finalmente analizar los resultados obtenidos ante la entrada paso, problemas de caída libre y vibración con amortiguación viscosa.
- Elaborar un manual de prácticas del computador analógico, para simular respuestas de primer y segundo orden ante la entrada paso, problemas de caída libre y vibración con amortiguación viscosa, pruebas y correcciones.

1. DESCRIPCIÓN DE MECANOS Y COMPUTADORES ANALÓGICOS MECÁNICOS

1.1 MECANO

Un mecano es un dispositivo o *kit* didáctico regularmente empleado para la enseñanza de la composición y funcionamiento de sistemas mecánicos; se compone esencialmente de una colección de elementos de máquinas especialmente diseñados para que se puedan ensamblar en diferentes combinaciones con funciones específicas. Estos componentes permiten la simulación esquemática de los diferentes mecanismos y sistemas de transmisión de potencia mecánica, con el fin de explicar el funcionamiento de las máquinas automáticas, los mecanismos básicos y elementos utilizados en todo tipo de máquinas, facilitando su estudio por medio de la interacción y/o manipulación funcional directa con el mecano y afianzando conocimientos mediante la visualización del mismo [13], [14], [15].

Los mecanos están constituidos principalmente por:

- Elementos Mecánicos Constitutivos (bastidor, soportes, carros móviles, etc.) que son los que constituyen la estructura y forma del mecano.
- Elementos de transmisión (engranajes, cadenas, correas, ejes de transmisión, etc.) los cuales transmiten el movimiento.
- Elementos de unión (remaches, tornillos, pasadores, grapas, etc.) que son los que unen los diferentes elementos del mecano.
- Elementos de pivotar y rodadura (rodamientos, cojinetes, resbaladeras, rótulas, etc.), que permiten el giro, deslizamiento o pivotaje de los elementos móviles.

Los anteriores elementos se combinan en el diseño para obtener funcionalidad y estética, haciendo de la construcción y operación de los mecanos una actividad realista y significativa en el proceso de formación. La Figura 12 ilustra uno de los mecanos existentes en el Laboratorio De Modelos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Figura 12. Mecano del Laboratorio De Modelos



Fuente: [15].

Este mecano fue construido con fines didácticos en la Universidad Tecnológica De Pereira por estudiantes del programa de Tecnología Mecánica para que fuese empleado por los estudiantes como un complemento a la teoría adquirida en asignaturas como lo son Diseño De Elementos De Máquinas y Mecánica De Maquinaria, sin embargo, con el transcurso del tiempo presentó elementos faltantes y averiados razones por las cuales quedó inhabilitado. Posteriormente, los estudiantes Alejandro Mariño Franco y Miguel Ángel Díaz Pulgarín, ejecutaron la reconstrucción, caracterización y modernización del mecano como trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, el cual culminó el 30 de octubre del 2008. El mecano en mención, presenta el funcionamiento de diferentes sistemas de transmisión de potencia mecánica empleados comúnmente en la industria tales como engranajes, cadenas y correas, los cuales siguen una misma cadena cinemática. Estas transmisiones se encuentran instaladas de forma tal que sea posible observar los diferentes tipos de montajes y aplicaciones. Toda la cadena cinemática debe su movimiento por la acción de un moto-reductor, el cual fue seleccionado de acuerdo con el consumo de potencia de todas las transmisiones en conjunto y con una velocidad de operación adecuada que facilitara la visualización de los diferentes mecanismos en movimiento, las transmisiones en operación y posibles aplicaciones, convirtiéndose este en una herramienta didáctica con la cual los estudiantes pueden interactuar de forma directa, permitiendo así una identificación de manera más clara de los diferentes tipos de transmisiones de potencia mecánica, en pro de afianzar y ampliar conocimientos adquiridos [15].

Por otra parte, existe también en Laboratorio De Modelos un Mecano Para El Análisis De Mecanismos De Cuatro Barras y Combinaciones, el cual permite la simulación esquemática de los mecanismos básicos con el propósito de facilitar su estudio. Los posibles mecanismos de cuatro barras a simular con este mecano son los mecanismos manivela-balancín, doble manivela y doble balancín, mecanismo manivela-deslizador, mecanismos de curvas, mecanismos de guía como el mecanismo de línea recta, mecanismos con detención, mecanismos de retroceso rápido, mecanismos de limadora, entre otros.

Adicionalmente se simulan también las inversiones de los mecanismos ya mencionados, siempre y cuando su diseño y construcción lo permitan [14].

El Mecano Para El Análisis De Mecanismos De Cuatro Barras y Combinaciones, está conformado por un conjunto de elementos tales como barras, deslizadores y pines mostrados en la Figura 13. Las barras se encuentran en dos presentaciones barras ranuradas y otras perforadas en toda su extensión. Los deslizadores se encuentran de dos tamaños y su forma permite el adecuado deslizamiento sobre las barras. El juego de pines permite ensamblar los eslabones de los mecanismos, conservando el principio de los planos paralelos, el cual es necesario para el correcto funcionamiento de estos. La sujeción entre pines y barras se hace con la asistencia de arandelas y retenedores. El mecano consta además de unos elementos auxiliares como los soportes que son los que permiten mantener la barra fija en un plano paralelo a su base y a unas distancias provechosas para cada caso, transportadores que sirven para examinar ángulos de rotación de los elementos del mecanismo y Grafo que permite obtener algunas curvas [14].

Figura 13. Mecano Para El Análisis De Mecanismos De Cuatro Barras y Combinaciones.



Fuente: autores

1.2 COMPUTACIÓN ANALÓGICA

Una computadora analógica es un tipo de computadora, que utiliza variables o aspectos continuamente cambiantes de los fenómenos físicos, tales como magnitudes eléctricas, mecánicas o hidráulicas, para así modelar un problema en particular, utilizando un tipo de cantidad física para representar otra. Estas computadoras analógicas, reaccionan directamente a los cambios del mundo real, sin que sea necesario transformar la información a forma digital [10].

Las computadoras analógicas, se construyeron inicialmente a principios del siglo XX. Los primeros ejemplares realizaban los cálculos por medio de elementos mecánicos como ejes y ruedas dentadas. La finalidad de estos artilugios era evaluar las adyacencias numéricas de ecuaciones extremadamente complejas como para poder ser solventadas mediante métodos convencionales. Durante la primera y la segunda guerra mundiales, se emplearon sistemas informáticos analógicos (inicialmente mecánicos y posteriormente eléctricos), para obtener predicciones de las trayectorias de los torpedos en los submarinos y para el mando a distancia de las bombas en la aeronáutica [16].

Las computadoras analógicas y los grandes ordenadores digitales-analógicos o híbridos, fueron utilizados principalmente en el ámbito científico, en aplicaciones industriales, en el control de fuego naval y en donde se presentará la necesidad de ejercer control sobre procesos en equipos digitales u optimizar el rendimiento insuficiente de maquinaria de la época, logrando un rango de complejidad muy amplio respecto de la simplicidad de reglas de cálculo y los nomogramas [10].

De manera general, las computadoras analógicas pueden presentar limitaciones ante alteraciones de tipo real que no son ideales. Una señal analógica se compone de cuatro elementos básicos: frecuencia, fase, magnitudes de corriente continua y corriente alterna. Los límites efectivos de rango de estas particularidades, restringen los ordenadores analógicos. Algunos de estos límites incluyen: la respuesta en frecuencia, el *offset* del amplificador operacional, ruido de fondo, ganancia finita, las no linealidades, coeficiente de temperatura, y las alteraciones de tipo parásitas al interior de los componentes semiconductores. Para los elementos electrónicos disponibles comercialmente, los intervalos de estos factores en las señales tanto de entrada como de salida, son siempre dignos de tener en cuenta [10], [16].

Para dar solución a un problema mediante un computador analógico, es necesario realizar un análisis general, una preparación de los datos, el desarrollo del circuito analógico y la programación del computador. También, se pueden ejecutar los subprogramas para probar su comportamiento, por medio de la evaluación de los resultados particulares del sistema, antes de ejecutar finalmente el programa en su totalidad, para obtener respuestas concluyentes. El método para llegar a resolver un problema compromete de manera general, siete pasos primordiales, descritos a continuación [16]:

- La situación en estudio u observación, se plantea por medio de ecuaciones matemáticas; cuando esto no es viable, la estructura del sistema y las influencias correspondientes a sus elementos, se determinan en un “Diagrama De Bloques”, donde cada bloque se describe en función de entrada y salida.
- Siempre y cuando sea necesario, las descripciones del sistema ya sea mediante ecuaciones o diagramas de bloques, deben ser reacomodadas de tal manera que posibiliten aprovechar las capacidades del computador, es decir, evitar las repeticiones y la sobrecarga de patrones computacionales, u omitir las iteraciones de tipo algebraicas que no sean integrativas.
- Mediante una información obtenida, trazar un diagrama de un circuito analógico que evidencie detalladamente, la forma en que el computador pueda ser programado

para así poder tratar el problema en cuestión y alcanzar los logros establecidos de la investigación.

- 4. Escalar apropiadamente, las variables y los parámetros del sistema para ajustarlos a los intervalos de operación del computador. Por esto, tal vez, se requiera realizar una revisión del esquema del circuito analógico y una selección de las unidades cómputo.
- Realizar la verificación de los valores de prueba después de haber establecido las condiciones iniciales del modelo completo del sistema y de la fijación de los valores numéricos a los atenuadores.
- Ejecutar el programa del computador analógico para dar solución a las ecuaciones o bien, para simular el diagrama de bloques, de modo que los valores resultantes obtenidos del sistema, puedan aportar a las respuestas iniciales y dar una visión general del comportamiento operacional del sistema.
- Ejecutar el programa reiteradamente, con el fin de examinar las respuestas para grupos determinados de parámetros, igualmente para reconocer los factores influyentes, causantes de cambios en el problema descrito por el sistema y el comportamiento provocado por la utilización de un ordenamiento del sistema con distintas funciones de entrada.

1.2.1 Computadores Analógicos Mecánicos

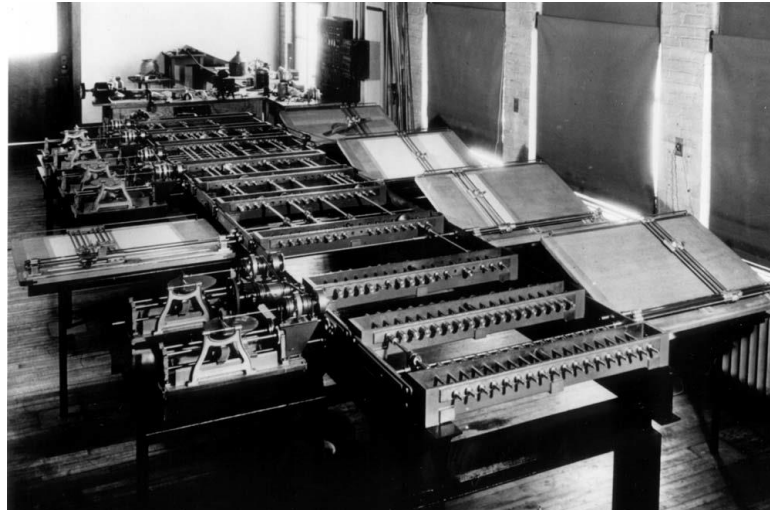
Entre los años 1945 y 1975, los equipos analógicos inexactos realizaron bastante bien su trabajo, tanto así que se convirtieron prácticamente imprescindibles en la carrera de la industria aeroespacial. Pese a que físicamente los equipos ya estaban obsoletos, la computación analógica, hizo un aporte duradero e importante a la metodología de diseño ingenieril. Los ordenadores analógicos introdujeron a los ingenieros de ese tiempo en la simulación por computadora, es decir, a la experimentación con modelos en tiempo real, adicionalmente la visión resultante también benefició al modelado matemático [17].

Con la práctica de la simulación digital a 20 años de distancia, la simulación analógica permitió realizar pruebas de nuevas ideas mucho antes de que se construyeran físicamente y las simulaciones eran incomparablemente más económicas que los experimentos de vuelo real. La simulación, que es de vital importancia para el diseño de vehículos y de sistemas de control, con el tiempo logró generar ambientes propicios de entrenamiento para pilotos y astronautas, en si las simulaciones analógicas contribuyeron notablemente en el afán del hombre de llegar a la luna [17].

El primer analizador diferencial (figura 14.), consistía en seis integradores mecánicos de ruedas y discos, tablas de trazado XY para proveer la entrada y grabar la salida y además un complejo sistema de ejes de interconexión para permitir que las distintas unidades pudiesen ser combinadas entre sí de acuerdo a los requerimientos de un problema en

particular. Estos mecanos se utilizaron tanto para la investigación científica como para el trabajo de balística militar con el estallido de la guerra en Europa. Además, fueron contruidos modelos simplificados para colegios y escuelas como material didáctico de la enseñanza del cálculo [17].

Figura 14. Prototipo del Analizador Diferencial de Vannevar Bush

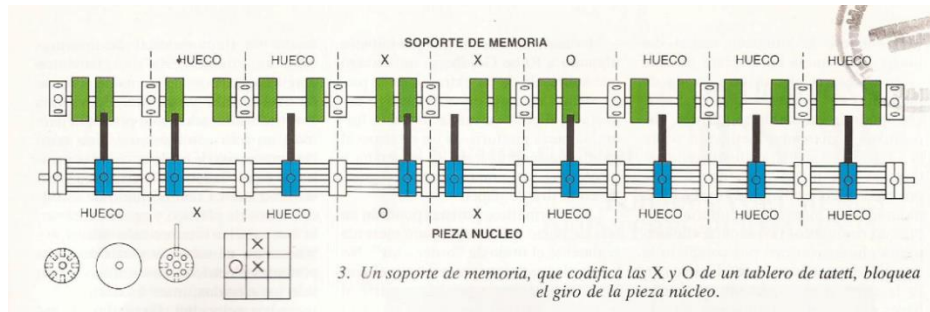


Fuente: [17].

Un grupo de estudiantes del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), conformado por *Erlyne Gee*, *Edward Hardebeck*, *Daniel Hillis*, *Margaret Minsky*, *Barry Silverman* y *Brian Silverman*, inició el desarrollo del computador en el año 1979 por petición de *Harry Loucks* (director del *Mid-America Center* en ese entonces), quien se puso en contacto con el grupo constructor con la intención de elaborar una nueva computadora mecano que funcionara de verdad, ya que en el año de 1975 *Hillis* y compañía, realizó un montaje en el MIT, del primer ordenador mecano (también para *Harry Loucks*) con el fin exhibirlo en el museo del *Mid-America Center* pero este ya en su ensamble final nunca funcionó del todo bien [17].

Este ordenador, resuelve partidas de tres en raya (“triqui”) por medio de un armazón llamado cabeza de lectura que desciende por el frente del bloque. Mientras desciende la cabeza de lectura, va examinando 48 hileras de “soportes de memoria” como el que se observa en la figura 15, donde están codificadas todas las combinaciones críticas de X y O [18].

Figura 15. Soportes de memoria

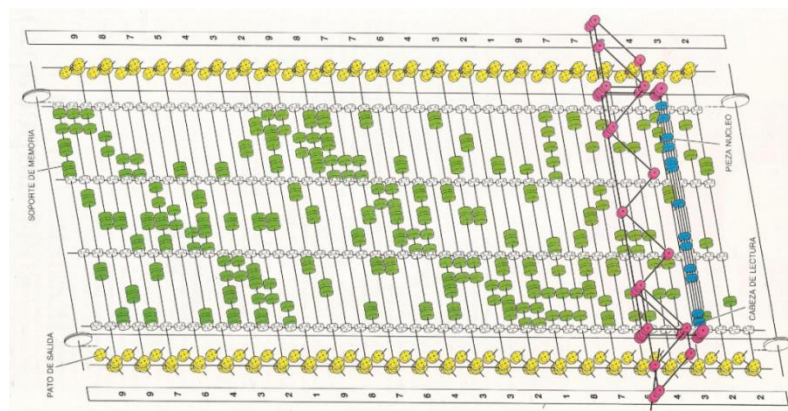


Fuente: [18].

En cierto punto una “pieza núcleo” ubicada bajo el armazón empieza a girar sobre sí misma y después golpea indirectamente a un “pato de salida” una construcción con forma de ave. El pato de salida se balancea en su percha y su pico queda señalando a un número, el cual determina la siguiente jugada del ordenador en una partida de tres en raya [18].

Este ordenador que se muestra en la figura 16, funciona de manera semiautomática, puesto que es necesario que un operador intervenga haciendo mover una manivela con el fin de subir o bajar la cabeza de lectura para proporcionar la información de entrada después de que el adversario del ordenador efectuó una jugada. El operador se dirige al frente del ordenador para ajustar la pieza núcleo alojada en la cabeza de lectura, para registrar en ella la jugada del oponente. Cuando la pieza descubre un soporte de memoria que recoge el estado actual del juego, la pieza núcleo entra en rotación y el ordenador señala cuál será su jugada [18].

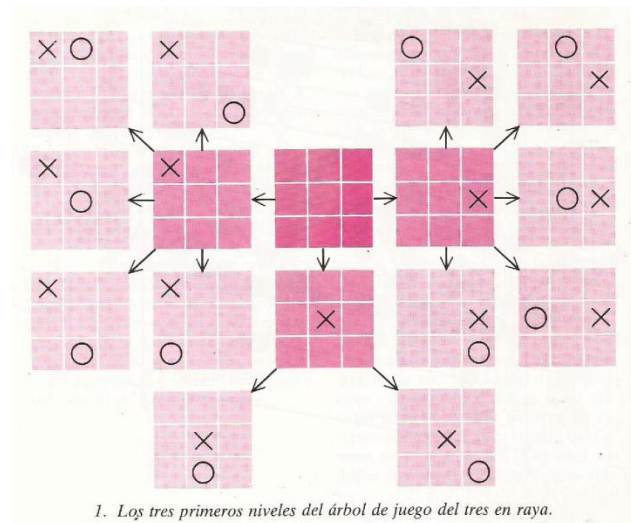
Figura 16. El Ordenador Mecano



Fuente: [18].

En el árbol de juego ilustrado en la figura 17, se puede observar que en el centro se ubica el tablero inicial, donde todavía no se ha acomodado ninguna jugada. Dependiendo de la casilla que X ocupe, se muestran solamente tres posibilidades, las otras seis se deducen dando pie a nuevos posibles casos [18].

Figura 17. Árbol de juego



Fuente: [18].

1.2.2 Computadores Analógicos Eléctricos

Las similitudes entre componentes mecánicos lineales (resortes y amortiguadores) y componentes eléctricos (condensadores, inductores y resistencias), llamaron la atención en términos matemáticos, ya que dichos componentes pueden ser modelados con ecuaciones de la misma forma. Por otra parte, la disparidad entre estos elementos, es lo que los hace útiles para la computación analógica, es decir, el sistema eléctrico es una paridad del sistema físico, pero que al momento de ser construido resulta ciertamente más seguro, menos costoso, y por lo general mucho más sencillo de modificar. Un montaje o circuito electrónico, ofrece la posibilidad operar normalmente en altas frecuencias, más que las del sistema que se pretende simular, permitiendo que la obtención de resultados sea más rápida que en tiempo real [16].

La desventaja de la paridad entre lo mecánico y lo electrónico, es que la parte electrónica se encuentra limitada por el intervalo en el cual una o las variables de un sistema pueden oscilar ("Rango Dinámico") y por los niveles de ruido inherentes a los flujos de señales eléctricas [16].

Los circuitos eléctricos generalmente son usados para realizar otros tipos de simulaciones como por ejemplo: la presión del agua puede ser representada por el voltaje y la tasa de flujo expresada en de metros cúbicos por segundo, puede ser simulada por la corriente eléctrica. Considerando que en la práctica el voltaje es mucho más fácil de trabajar y que la corriente se utiliza atípicamente en ordenadores analógicos electrónicos, tanto el caudal como el volumen acumulado de un fluido, son variables que se pueden asumir como voltajes [15], [16].

El factor precisión en un computador tipo analógico eléctrico, se encuentra limitado primordialmente por: los componentes de cómputo, la naturaleza de la energía interna e interconexiones eléctricas y adicionalmente por la ambigüedad del equipo de lectura empleado [15], [16].

La GP-6 (figura 18), es una unidad autónoma fabricada por la empresa estadounidense *Comdyna*, capaz de simular sistemas lineales y no lineales de hasta cuatro variables de estado. Más de 2.000 ordenadores GP-6 analógicos se han instalado en más de 400 laboratorios universitarios, gubernamentales y de investigación comercial [19].

Figura 18. The GP-6 Analog Computer



Fuente: [19].

Este equipo, después de una trayectoria de 36 años, se ha descontinuado, pero *Ray Spiess* (*fundador y presidente de Comdyna*), asegura apoyar la GP-6 con piezas y servicio técnico durante el tiempo que sea posible [19].

La computación analógica continúa prosperando en forma de circuitos lineales. El panel de conexión de ordenador analógico sigue siendo el único medio de circuitos lineales de programación, es decir, los amplificadores operacionales en el sin número de dispositivos de circuitos analógicos. Laboratorios de control son las instalaciones principales. El GP-6 es el punto de partida ideal para la enseñanza de diseño clásico sistema de control [19].

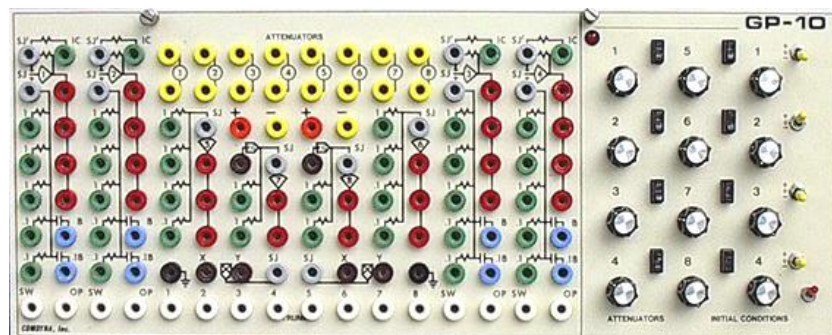
Las experiencias con la GP-6, no sólo fueron un reto fundamental del problema de control, sino una práctica en el desarrollo de la física del sistema en su modelo de las matemáticas, la programación de panel de conexiones de dispositivos lineales en circuitos de interfaz y controlador, escalando variables analógicas y el uso de la simulación como una herramienta para tanto el análisis inductivo y deductivo [19].

También se usó la GP-6 en demostraciones de tipo académicas y proyectos de diseño avanzados, donde las simulaciones programables funcionaron como plantas lineales y no lineales controlables. Las simulaciones GP-6 eran de alta velocidad, continuas y realistas sustitutas de los sistemas de control analógico de pruebas y controladores digitales [19].

Aparte de la enseñanza, la GP-6 encontró aplicación como un instrumento portátil de propósitos prácticos generales, el panel de conexión GP-6 fue un medio bastante rápido al momento de programar a diferencia de la *Protoboard* para circuitos lineales [19].

El GP-10 / GP-10S (figura 19) es el computador analógico producido actualmente por *Comdyna*, para el procesamiento de señales analógicas y de creación. La única diferencia entre los dos equipos es que el GP-10S, ofrece un chasis independiente con fuente de alimentación interna y el GP-10 es un marco *Openback* donde la energía se suministra externamente [19].

Figura 19. Gp-10 and Gp-10s



Fuente: [19].

1.2.3 Ordenadores Híbridos

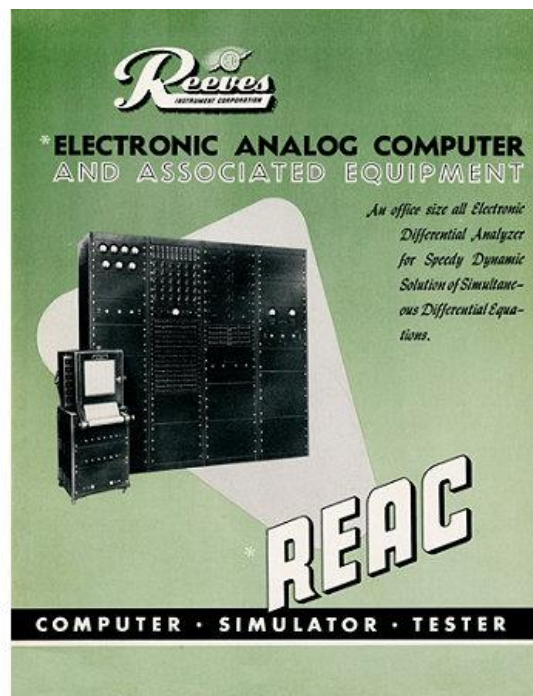
Los ordenadores híbridos o también llamados analógico-digitales, son un acoplamiento entre un computador digital y un computador analógico, el cual entrega una salida analógica que se transforma en dígitos, para así poder ser enviados a un computador digital común para ejecutar cálculos. A causa de los progresos en la década de los 70's en cuanto a tecnología y por su facilidad de uso, los ordenadores híbridos y digitales, paulatinamente fueron reemplazando los sistemas exclusivamente analógicos [10].

Los computadores híbridos son usados para estimar un valor numérico con buena exactitud; utilizando un computador analógico como la parte frontal, el valor que se ingresa en un computador digital, por medio de un proceso basado en iteraciones, se logra alcanzar el grado de precisión que se desea. Con una estimación de una elevada exactitud numérica de tres o cuatro dígitos, se reduce considerablemente el tiempo global de cómputo digital, ya que la cantidad de iteraciones digitales necesarias para tal fin, también se reducen. El computador híbrido es escasamente más exacto que un computador digital, pero puede proporcionar un cómputo mucho más exacto que el de un computador analógico (apropiado para aplicaciones ejecutadas en tiempo real [10].

La revista *IEEE Control Systems Magazine* [17] Menciona las principales fuerzas motrices de la posguerra para desarrollos informáticos analógicos comerciales eran agencias de defensa del gobierno. En los Estados Unidos, la Oficina de Investigación Naval (ONR) proporcionó una financiación considerable. Este apoyo, entre otras cosas, dio lugar a:

- *Project Cyclone* con *Reeves Instrument Corporation* (New York), concibió la primera computadora analógica comercial REAC (*Reeves Electronic Analog Computer*) en 1948. Los primeros usuarios fueron *John Hopkins University Applied Physics Laboratory* y la Universidad de *Minnesota*. El equipo desarrollado para el Proyecto, utiliza 4.000 tubos de vacío. Para 1951, había más de 60 sistemas de REAC (figura 20.) en aproximadamente de 40 instalaciones.

Figura 20. Primera computadora analógica comercial REAC



Fuente: <http://www.computerhistory.org/revolution/analog-computers/3/150/354>

- El equipo que resultó de *Project Typhoon* con RCA's *Electronic Computer Section* se mostró por primera vez en *Princeton* en 1950. El equipo se utilizó hasta 1968 para el diseño de aeronaves militares y el vehículo de investigación X-15 propulsado por cohetes. Su costo inicial fue de aproximadamente \$ 3 millones de dólares y fue posteriormente sustituido en su último año de uso por un equipo de transistores (que ocupaba un décimo de la cantidad de espacio) a un costo de \$ 1,5 millones de dólares.

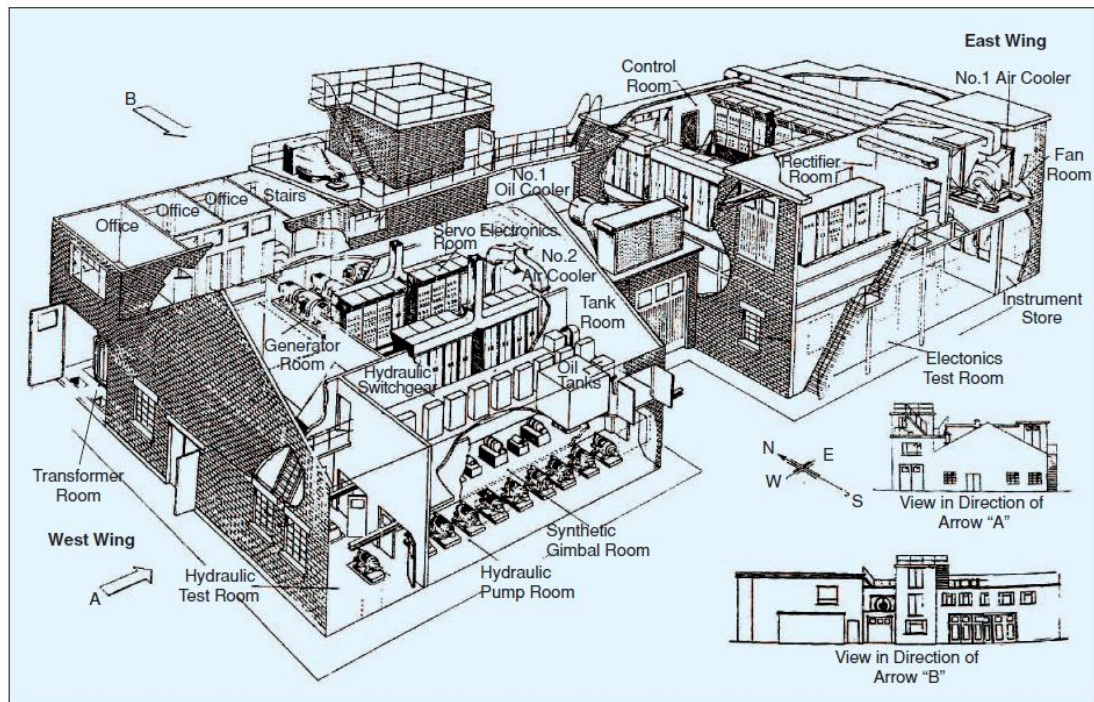
En otra instancia, en este caso para la Fuerza Aérea de Estados Unidos, llevó a la *Boeing Computer Electronic Analog* (BEAC) y a *Goodyear Electronic Differential Analyser* (GEDA) a desarrollar productos comerciales a inicios de la década de 1950.

En el Reino Unido, el Ministerio de Abastecimiento (MOS) financió varios proyectos informáticos analógicos en el *Royal Aircraft Establishment* (RAE) y el *National Physical Laboratory* (NPL). Un grupo de investigación formado en 1945 tomó las ideas iniciadas durante la última parte de la guerra. Este esfuerzo se tradujo por primera vez en GEneral PURpose Simulator (GEPUS), una máquina construida por Plessey Company con alrededor de 850 tubos de vacío. Esta máquina fue seguida por la Three Dimensional Analog Computer (TRIDAC).

TRIDAC fue instalada en *Farnborough*, ubicado en la región Sur Este en el Reino Unido en 1954. La Figura 21 muestra el *layout* de TRIDAC en el edificio especialmente diseñado para albergar a la computadora; algunos detalles adicionales como:

- Costo: UK £ 0.75 millones
- Precisión: 0,1%
- Componentes electrónicos, mecánicos e hidráulicos
- Simulaciones en tiempo real y las posibilidades de interactuar con hardware real
- Servos hidráulicos para la traslación de coordenadas
- 2000 amplificadores, 8.000 tubos de vacío, de 6×10^4 cc, ganancia DC y ± 30 V de salida
- Redes de diodos
- 200 kW y 400 kW de potencia en electrónica e hidráulica respectivamente

Figura 21. Layout de TRIDAC



Fuente: [17]

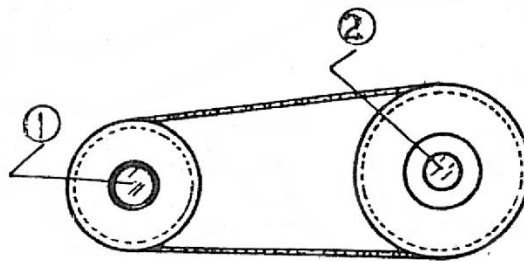
Con el surgimiento y desarrollo de la computación digital, a mediados del siglo XX comenzó una época de declive y desuso de este tipo de mecanismos, pero su trabajo y estudio, marcó un hito en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, expediente necesario para la evolución de la Ingeniería.

2.1 OPERACIONES MATEMÁTICAS POSIBLES EN EL COMPUTADOR ANALÓGICO

2.1.1 Multiplicación Por una Constante

Para el caso de una variable “X” (representada por la rotación de un eje), que puede ser multiplicada por una constante “C” para producir una salida “CX”, por un mecanismo de bandas y poleas como se muestra en la Figura 23, la cual puede considerarse como una configuración de elementos de máquinas bastante simple.

Figura 23. Esquema de mecanismo multiplicador por banda y poleas



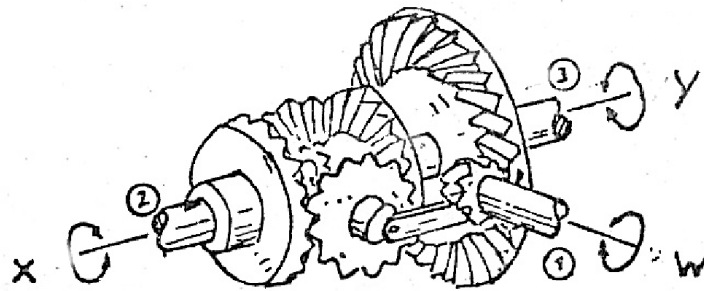
Fuente: [8]

Para el montaje mostrado en la Figura 17, la variable “X” es caracterizada por la rotación del eje N°1., es decir, la polea en el eje 1 tiene un tamaño de 12 unidades y la polea en el eje 2 tiene un tamaño de 16 unidades, por lo tanto, la salida en el eje 2 es: $(12/16) X = 0,75 X$ y para la entrada “X”, puede ser asumido cualquier valor. Los valores tanto positivos como negativos, pueden ser manipulados con facilidad, al especificar la dirección en el sentido de las manecillas del reloj, es decir, se establece el sentido horario como positivo y el sentido antihorario como negativo (La multiplicación por una constante negativa se logra cruzando la banda directriz).

2.1.2 Adición y Sustracción

Un mecanismo diferencial similar al usado en los automóviles, se utiliza para adicionar y sustraer variables como se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Esquema de mecanismo diferencial para adición y sustracción



Fuente: [8]

El mecanismo del eje 1 del sumador, se conecta a un diferencial que mueve los ejes 2 y 3. La rotación del eje del mecanismo, es proporcional a la suma de las revoluciones de la rueda. Matemáticamente esto puede ser expresado como lo indica la ecuación (1):

$$W = C (X+Y) \quad (1)$$

donde,

W es la salida;

C es una constante;

X es una entrada para una variable;

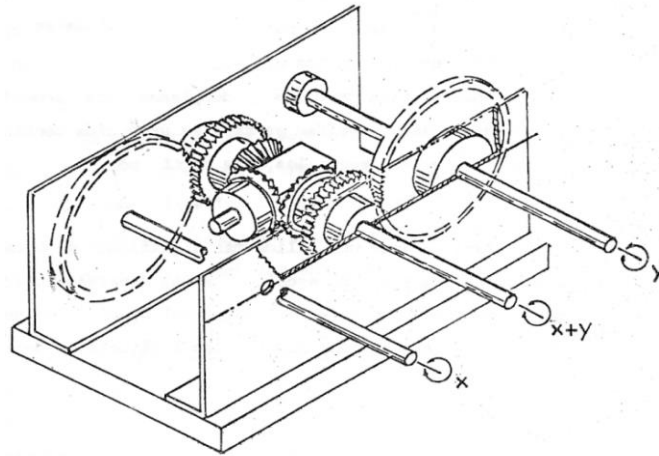
Y es otra entrada para una variable;

Puesto que, tanto la entrada "X" como la entrada "Y", pueden ser negativos, es decir, para ingresar los valores, se hacen girar los respectivos ejes en sentido antihorario. El mecanismo diferencial puede ser usado no solo para adicionar sino también para sustraer, ya sea "X" o "Y" para así generar una salida "W" como lo enseña la ecuación (2):

$$W = -C (X+Y) \quad (2)$$

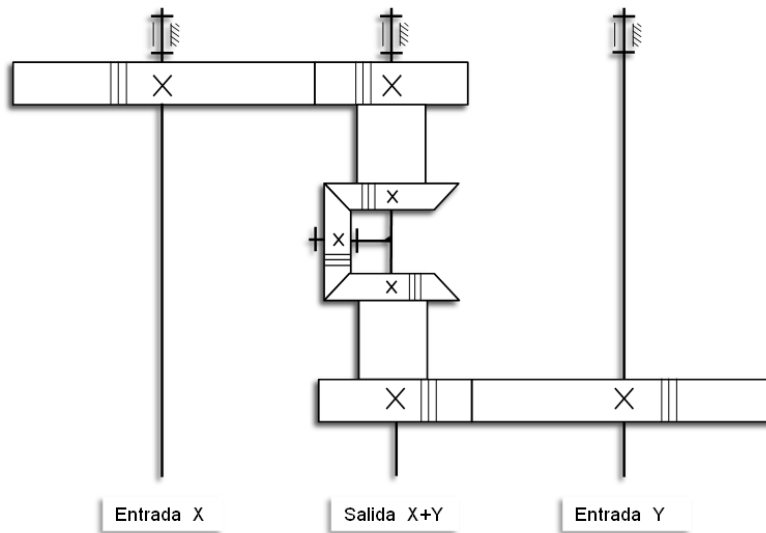
En la Figura 25, se observa de manera completa el montaje del mecanismo sumador, el cual está construido con los ejes en ángulo recto y todos sus componentes son engranajes cónicos y rectos. El mecanismo sumador, se ensambla en el computador proyectando sus tres ejes a través del panel frontal. Los engranajes se aseguran a los ejes mediante tornillos prisioneros, para facilitar la transmisión entre ejes, los cuales representan variables.

Figura 25. Ensamblaje de mecanismo diferencial para adición y sustracción del computador analógico



Fuente: [8]

Figura 26. Cadena cinemática de unidad de adición y sustracción

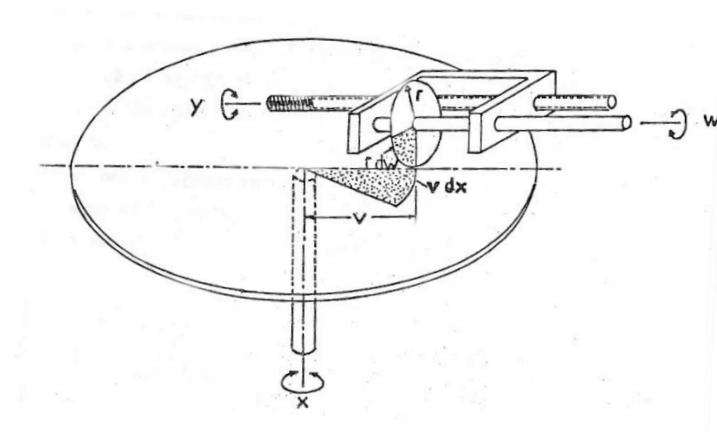


Fuente: Autores

2.1.3 Integración

El mecanismo utilizado para desarrollar los procesos equivalentes de integración, consiste en un disco y una rueda, cuya configuración se muestra en la figura 26. Las entradas "X", "Y" y la salida "W" de este subsistema, se realizan por medio de rotaciones, donde la variable "X" es ingresada por medio del giro del eje que se encuentra unido al disco, del mismo modo, la variable "Y" es ingresada al subsistema mediante la rotación de un eje roscado donde el avance de dicho eje, posiciona la rueda en el disco y se ve reflejada en la distancia "V" de la rueda, tomada desde el centro del disco como punto de partida.

Figura 27. Esquema de mecanismo para procesos de integración



Fuente: [8]

Asegurando un ajuste entre las superficies de contacto que no permita deslizamiento entre el disco y la rueda, y que además si el disco rota una cantidad elemental dx , el punto de contacto bajo la rueda, se desplazará a través de un arco de longitud Vdx , este movimiento, ocasiona en la rueda una rotación de suma dw . El punto de contacto de la rueda se moverá a lo largo de un arco de longitud rdw , entonces estas longitudes de arco son iguales y por consiguiente se cumple la igualdad de la ecuación (3):

$$rdw = Vdx \quad (3)$$

donde,

rdw es la longitud de arco de disco (salida de integrador);

Vdx es la longitud de arco de rueda (entrada X);

La rotación de la rueda W puede ser expresada como se observa en las ecuaciones (4) y (5):

$$\int dw = \frac{1}{r} \int V dx \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{r} \int V dx \quad (5)$$

donde,

dw es la rotación de suma;

r es el radio de la rueda;

W es la rotación de la rueda;

dx es la rotación;

V es una distancia lineal;

Como W y dx son rotaciones del eje; y V una distancia lineal. No obstante, esta distancia es relativa al número de rotaciones del eje roscado. En este computador, el eje roscado es de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro con 24 hilos por pulgada. Por lo tanto, la distancia V puede ser convertida a rotaciones del eje de la entrada de la variable Y , entonces $V = Y/24$. y puesto que en el computador el radio de la rueda es de aproximadamente 1 pulgada la expresión para el integrador se convierte como se observa en las ecuaciones (6) y (7).

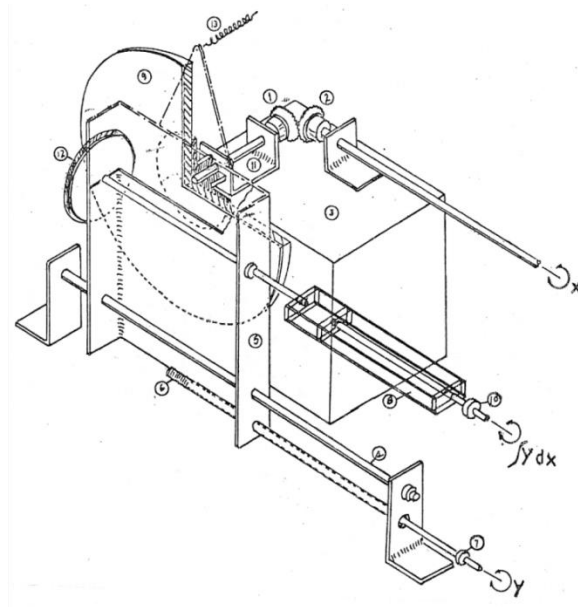
$$W = \frac{1}{r} \int \left(\frac{Y}{24} \right) dx \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{24} \int Y dx \quad (7)$$

El mecanismo de disco, rueda y eje roscado, puede ser usado para producir una salida que es proporcional a la integral de “Y” con respecto a “X”. Todas las variables se representan por rotaciones de eje.

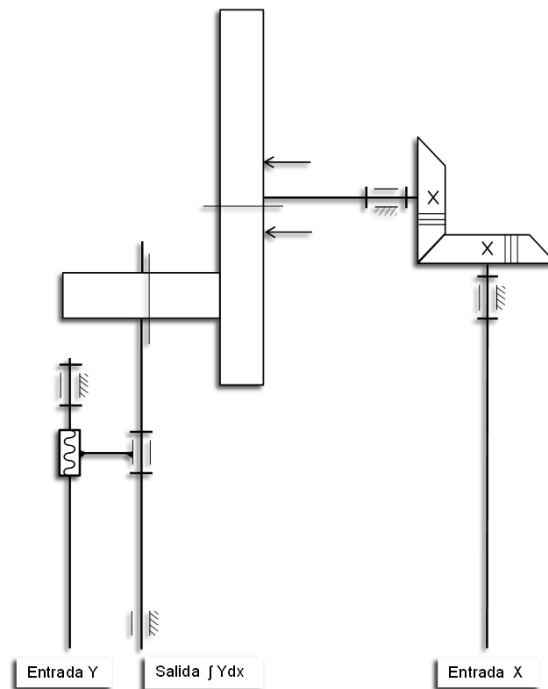
En la figura 27, se observa de manera completa la configuración del subsistema de integración. Este subsistema posee dos ejes paralelos entre sí pero el eje correspondiente a la variable “X” se encuentra en ángulo recto con respecto a los demás ejes. En la operación el disco se dispone de forma vertical por motivos de dimensión y espacio [18].

Figura 28. Configuración del mecanismo para procesos de integración del computador analógico



Fuente: [8]

Figura 29. Cadena cinemática de la unidad de integración

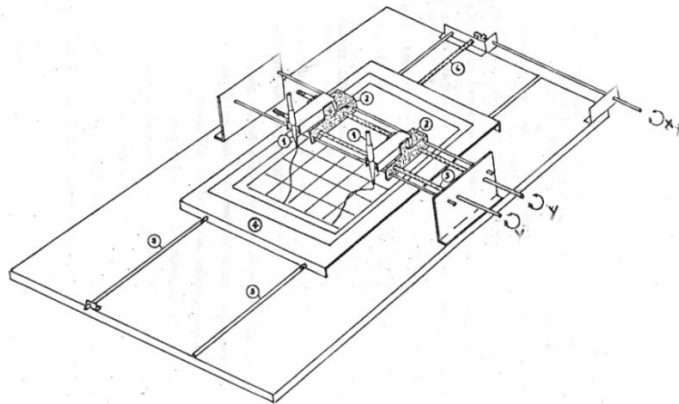


Fuente: Autores

2.2 SISTEMA DE GRAFICACION X-Y

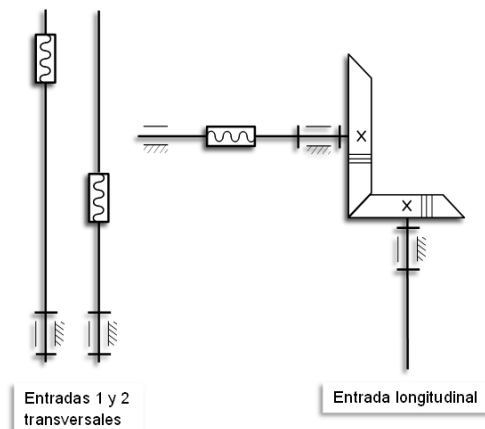
Los resultados son entregados por el equipo en forma de rotaciones de ejes, los cuales se acoplan al dispositivo graficador. El graficador se compone de dos plumas independientes las cuales se encuentran sostenidas en un carro que es movido por un eje roscado. Las plumas captan la rotación de cualquier eje al cual están conectadas. La base sobre la cual se coloca el papel para gráfica, está montada sobre deslizadores los cuales se desplazan por medio de un eje roscado en una dirección perpendicular al movimiento de las plumas; todo ello ilustrado en la figura 28.

Figura 30. Esquema dispositivo graficador



Fuente: [8]

Figura 31. Cadena cinemática del sistema de graficación



Fuente: Autores

3. DIAGNÓSTICO DEL COMPUTADOR ANALÓGICO E INVENTARIO DE PIEZAS ROTAS, DEFECTUOSAS O FALTANTES

Al iniciar la ejecución del proyecto fue necesario realizar un inventario de los diferentes elementos que componen el computador analógico mecánico, con base al documento original del mismo [8]. Para elaborar este inventario, inicialmente se hace una identificación de cada subsistema en particular como son la Unidad de adición y sustracción, la Unidad de integración y el Sistema de graficación X-Y; posterior a esta tarea se procedió a identificar y diagnosticar el estado de cada uno de los componentes de los diferentes subsistemas.

Al momento de ejecutar el diagnóstico del estado de cada componente de los diferentes subsistemas se evidenciaron diferentes estados que se definen a continuación:

BUENO: estado adecuado del componente que lo hace funcional.

DEFECTUOSO: estado inapropiado del componente que lo inhabilita para su uso.

FALTANTE: inexistente y necesario para el correcto funcionamiento del subsistema.

3.1 UNIDAD DE ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN

El computador analógico mecánico presenta originalmente una unidad de adición y sustracción, pero aparentemente y posterior a la construcción original del ordenador, hubo un intento de ampliación, por lo cual se cuenta con dos unidades adicionales. Las unidades adicionales también quedaron incluidas en el proceso de restauración. Los estados de los componentes de dicha unidad se encuentran en la tabla 1.

Tabla 6. Unidad de adición y sustracción

UNIDAD DE ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN				
Nº	PIEZA	CANTIDAD	ESTADO	ACCIÓN
1	Base de acrílico	3	Defectuoso	Fabricar
2	Ejes 5/32"	9	Defectuoso	Fabricar
3	Tornillo 1/2" longitud	3	Defectuoso	Fabricar
4	Fijadores 5/32"	12	Defectuoso	Fabricar
5	Pieza acrílico	3	Defectuoso	Fabricar
6	Piñón recto 72 N	6	Defectuoso	Fabricar
7	Piñón recto 36 N	6	Defectuoso	Fabricar
8	Piñones cónicos 20 N	9	Defectuoso	Fabricar
9	Tornillo prisionero 1/8"	3	Defectuoso	Fabricar

Fuente: Autores

3.2 UNIDAD DE INTEGRACIÓN

El computador analógico mecánico tiene dos unidades de integración. Los estados de los componentes de dicha unidad se encuentran en la tabla 2.

Tabla 7. Unidad de integración

UNIDAD DE INTEGRACION				
Nº	PIEZA	CANTIDAD	ESTADO	ACCIÓN
1	Piñones cónicos 20 N	4	Defectuoso	Fabricar
2	Resorte	2	Defectuoso	Fabricar
3	Disco de madera 5/1/4"	2	Defectuoso	Fabricar
4	Rueda para tocadiscos	2	Defectuoso	Fabricar
5	Extensor telescópico	2	Defectuoso	Fabricar
6	Construcciones y base de acrílico	2	Defectuoso	Fabricar
7	Tuerca de 1/2"	2	Bueno	Limpiar
8	Tornillo de 1/2" - 24 - UNF - 9	2	Bueno	Limpiar
9	Placa de acrílico	2	Defectuoso	Fabricar
10	varilla de 5"	2	Defectuoso	Fabricar
11	Fijadores 5/32"	10	Defectuoso	Fabricar
12	Fijadores 5/16"	2	Defectuoso	Fabricar

Fuente: Autores

3.3 SISTEMA DE GRAFICACIÓN X-Y

El computador analógico mecánico presenta un sistema de graficación X-Y, el cual es la unidad más afectada, puesto que solo se cuenta con un tornillo sin fin de 1/2 in de diámetro y 24 hilos por pulgada, ubicado de manera longitudinal para mover la mesa en ese mismo sentido. Los estados de los componentes de dicha unidad se encuentran en la tabla 3.

Tabla 8. Sistema de graficación X-Y

SISTEMA DE GRAFICACIÓN X-Y				
Nº	PIEZA	CANTIDAD	ESTADO	ACCIÓN
1	Mesa	1	Defectuoso	Fabricar
2	Varillas guías mesa 5/32"	2	Defectuoso	Limpiar
3	Apoyos	6	Defectuoso	Fabricar
4	Varillas guías transversales 5/32"	2	Faltante	Fabricar
5	Pluma	2	Faltante	Fabricar
6	Carro porta-pluma	2	Faltante	Fabricar
7	Placa tope	1	Faltante	Fabricar
8	Placa de apoyo	2	Defectuoso	Fabricar
9	Tornillo transversal de 1/2" - 24 - UNF - 9	2	Faltante	Fabricar
10	Tornillo longitudinal de 1/2" - 24 - UNF - 9	1	Bueno	Limpiar
11	Piñones cónicos (Razón 1:2)	2	Faltante	Fabricar
12	Eje 5/32"	1	Faltante	Fabricar
13	Fijadores guías transversales 5/32"	4	Defectuoso	Fabricar
14	Fijadores 5/32"	3	Defectuoso	Fabricar

Fuente: Autores

3.4 JUEGO DE POLEAS Y CORREAS

El computador analógico mecánico cuenta con un juego de poleas compuesto por 18 elementos las cuales se disponen según el arreglo a tratar y se nombran de acuerdo con su diámetro exterior en centímetros y al diámetro del eje de montaje de cada arreglo.

Las diferentes poleas se encuentran en la tabla 4 que se muestra a continuación:

Tabla 9. Juego de poleas

JUEGO DE POLEAS			
PIEZA	CANTIDAD	ESTADO	ACCIÓN
Polea 1-5/32"	2	Defectuoso	Fabricar
Polea 2-5/16"	1	Faltante	Fabricar
Polea 2-3/16"	3	Faltante	Fabricar
Polea 3-5/16"	1	Defectuoso	Fabricar
Polea 3-5/32"	4	Defectuoso	Fabricar
Polea 4-5/16"	3	Defectuoso	Fabricar
Polea 4-5/32"	2	Defectuoso	Fabricar
Polea 6-5/32"	2	Faltante	Fabricar

Fuente: Autores

En el inventario inicial del computador analógico, no se encontró ninguna de las correas necesarias para el funcionamiento, pero se supo que el elemento usado para transmitir el movimiento entre las poleas eran ligas o pequeñas bandas de caucho las que cumplían dicha función. Para realizar el inventario de correas de transmisión mostrado en la tabla 5, se tuvo en cuenta su ubicación respecto de cada arreglo y las poleas comprometidas en la transmisión para no redundar en cuanto a la cantidad de las mismas.

Tabla 10. Juego de correas

JUEGO DE CORREAS				
PIEZA	POLEAS COMPROMETIDAS	CANTIDAD	ESTADO	ACCIÓN
Correa j1 → Y2	Polea 1-5/32" → Polea 4-5/16"	1	Faltante	Adquirir
Correa X1 → X2	Polea 3-5/32" → Polea 3-5/32"	1	Faltante	Adquirir
Correa X2 → ELG	Polea 3-5/32" → Polea 3-5/32"	1	Faltante	Adquirir
Correa j2 → ET2G	Polea 2-5/32" → Polea 4-5/16"	1	Faltante	Adquirir
Correa X+Y → Y1	Polea 2-5/32" → Polea 4-5/16"	1	Faltante	Adquirir
Correa X+ → Y2	Polea 6-5/32" → Polea 3-5/16"	1	Faltante	Adquirir
Correa Y+ → j2	Polea 4-5/32" → Polea 1-5/32"	1	Faltante	Adquirir
Correa X2 → ELG	Polea 2-5/32" → Polea 6-5/32"	1	Faltante	Adquirir
Correa X+ → ET1G	Polea 4-5/32" → Polea 2-5/16"	1	Faltante	Adquirir
Correa X+Y → Y2	Polea 3-5/32" → Polea 3-5/16"	1	Faltante	Adquirir

Fuente: Autores

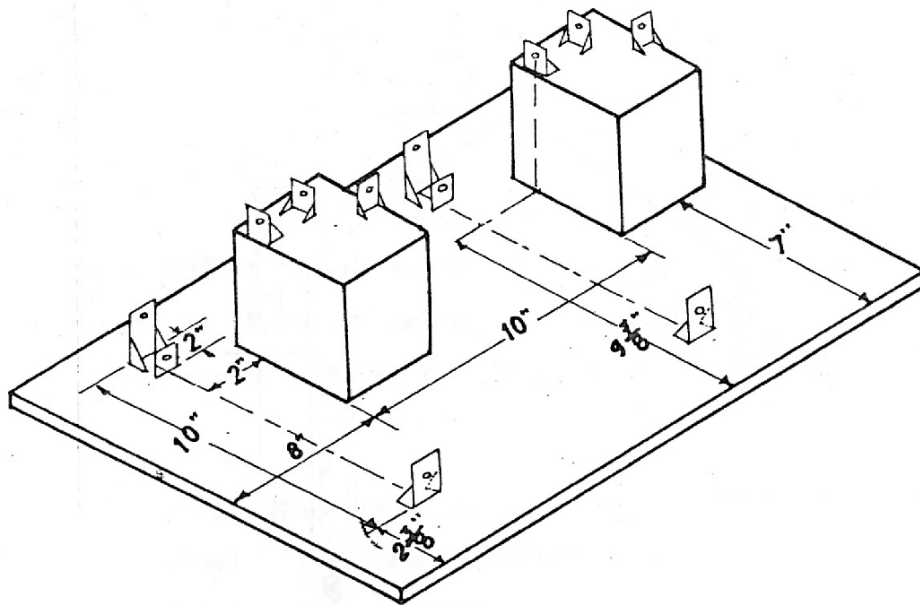
4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DE PIEZAS ROTAS, DEFECTUOSAS O FALTANTES.

Para la ejecución de esta parte del proyecto, fue necesario utilizar toda la tecnología a disposición, es decir software CAD, corte laser, corte por plotter 2D, e impresión 3D con tecnología SLA.

De acuerdo al diagnóstico del estado del computador analógico, se procedió entonces a fabricar e instalar las piezas faltantes, rotas o defectuosas. Para ello se toma como referencia el documento original [8], donde se exponen las formas y dimensiones de casi todas las piezas.

Como punto de partida se tomó el bastidor o estructura inferior (Figura 32) del equipo que está fabricado en placas de que van desde 3 mm a 5 mm dependiendo de la pieza, se les refiere a estas como paneles, soportes, entre otras partes a desarrollar. Con la finalidad de reducir la fabricación de prototipos físicos se realiza una simulación del montaje general que permita inspeccionar y evidenciar errores o discrepancias en las medidas. Por esta razón se optó por dibujar cada una de las piezas de la estructura en *AUTODESK INVENTOR* que es un software de diseño que integra elementos 2D y 3D en un mismo escenario virtual. Esta integración es de gran utilidad ya que con los datos 2D se fabrican piezas que requieren archivos específicos como lo es el formato .dxf (*Drawing Exchange Format*) el cual se utiliza en el corte por láser y en el corte por *plotter*.

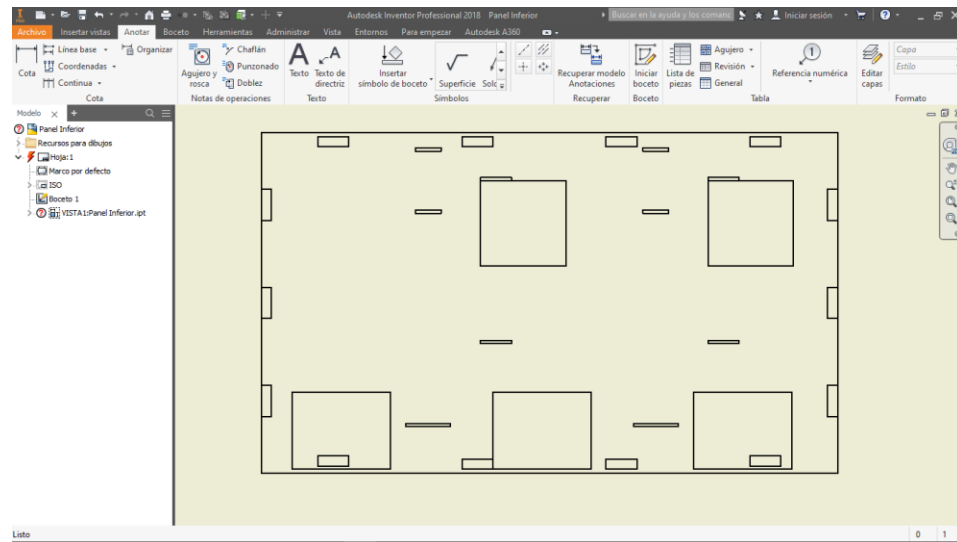
Figura 32. Esquema placa base



Fuente: [8]

En el montaje fue necesario entonces recurrir a plantillas que permitan un montaje practico y que también reduzcan los rangos de tolerancia. En la Figura 33 se muestra el esquema de distribución y posición de soportes. Esta distribución es obtenida a partir de un dibujo 3D que posteriormente se transfiere como archivo 2D o .dxf para que sea leído por el *plotter* de corte en donde se genera la imagen sobre un plástico adhesivo o vinilo basada en el esquema original expuesto en la Figura 32.

Figura 33. Imagen placa base en formato .dxf



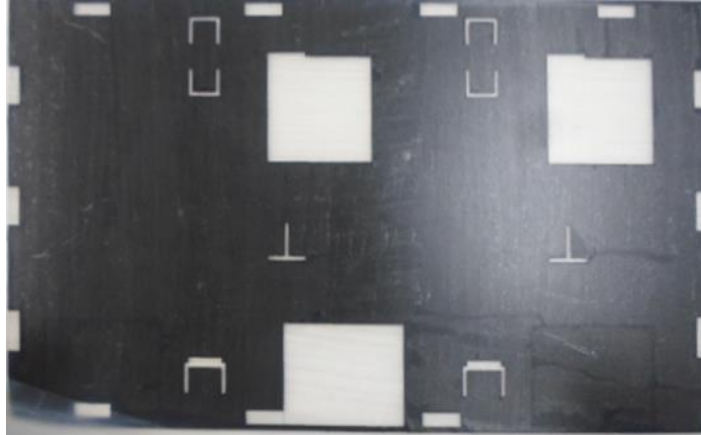
Fuente: Autores

De la misma manera en que se generan los archivos de corte 2D para el *plotter*, se obtienen los archivos que se utilizan en el corte laser, que es la tecnología a usar para el caso de las placas de acrílico ya sea para cortar los paneles o los soportes que se requieren para el ensamble de ejes, ruedas dentadas y demás partes propias del equipo. El acrílico a usar son placas tipo cristal, esto con la finalidad de que al momento del funcionamiento se puedan observar los mecanismos interactuando entre sí, lo que sería ideal en términos didácticos.

Antes del montaje del vinilo sobre la placa de acrílico se debe limpiar la superficie para retirar cualquier suciedad que impida el correcto montaje del vinilo sobre la placa de acrílico, posteriormente se aplica una capa de jabón líquido diluido en agua con una relación aproximada de 2 a 10 respectivamente, esto se hace para que la solución lograda sirva como lubricante y poder ubicar el vinilo en su posición final. El exceso del líquido se remueve con una rasqueta plástica para no dañar el vinilo y lograr que la película de vinilo se adhiera a la placa de acrílico y luego poder retirar las zonas cortadas que sirven de guía para posicionar las piezas correctamente sin realizar medición alguna puesto que el adhesivo conserva las relaciones de distancia y tiene las mismas dimensiones perimetrales

del panel base lo que permite hacer coincidente los contornos de ambos elementos al estar superpuestos (figura 34).

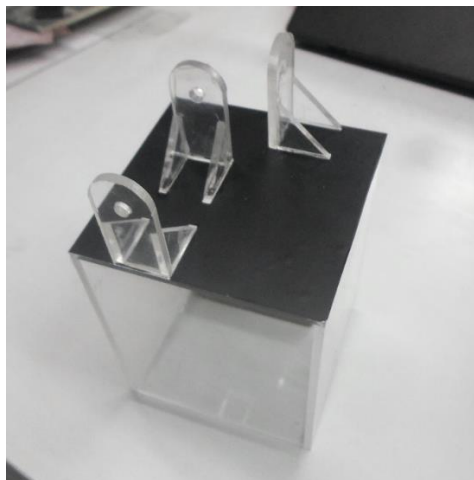
Figura 34. Vinilo sobre placa base de acrílico



Fuente: Autores

Después de tener la plantilla en posición se continua con el resto del montaje ubicando los soportes ensamblados previamente.

Figura 35. Soporte ejes de entrada X integrador



Fuente: Autores

Con el objetivo de unir las piezas acrílicas de manera permanente se usaron tres sustancias químicas las cuales van a depender de la situación, es decir, para las superficies planas se usa el cloruro de metileno que es una solución transparente que diluye temporalmente el acrílico haciendo que las piezas en contacto se suelden entre sí de manera homogénea. Si se requiere reforzar o rellenar las uniones se recomienda el uso de metacrilato o acrílico líquido describiendo este como un monómero líquido y transparente que al mezclarlo con polímero en polvo de resina se forma un líquido espeso adicionando acrílico en los espacios o en las intersecciones que existan entre las piezas a unir y para casos diferentes a los anteriores está el cianoacrilato o pegante instantáneo el cual funciona muy bien ya que no solo pega de manera permanente sino que también sirve para rellenar como el metacrilato y tiene un efecto de soldadura muy similar al del cloruro de metileno y no por el diluir el acrílico.

Para el uso de cualquiera de las sustancias descritas anteriormente se tuvieron en cuenta algunos puntos:

1. Buscar un espacio de trabajo ventilado en donde la superficie de trabajo sea de concreto, metal o madera y no contenga vidrio o papel.
2. En específico para el cloruro de metileno, las partes a unir deben estar planas y se recomienda que las superficies a unir estén ligeramente lijadas y no brillen, ya que una superficie muy lisa es difícil de unir. El uso de una jeringa es ideal para aplicar el cloruro ya que permite que este pase entre las superficies y llene cualquier unión o espacio.
3. Se debe limpiar todos los lados del acrílico con un paño limpio con alcohol Isopropílico, esta quita toda la suciedad, el polvo y residuos de grasa que puede afectar con el proceso de pegado.

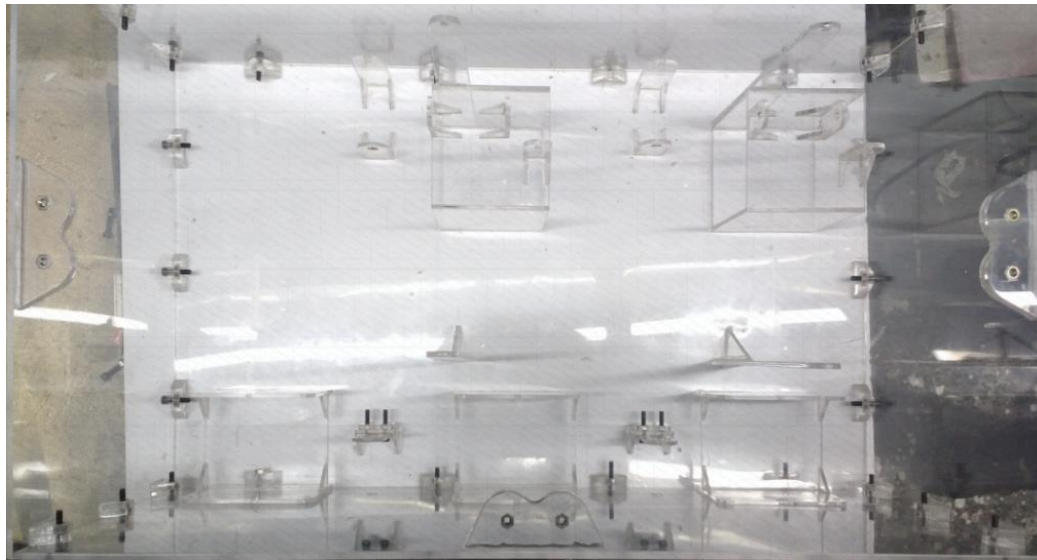
Figura 36. Sujetador de paneles



Fuente: Autores

El montaje de las placas se realizó por sujeción mecánica mediante unos elementos perforados que van fijos en la placa base (Figura 36), estos elementos llevan un hexágono en donde se inserta una tuerca métrica para tornillo de 4mm (M4), lo que permite realizar un ensamble más conveniente a la hora de realizar ajustes en los elementos mecánicos internos del equipo incluyendo el armado de la estructura ya que se minimiza el uso de herramienta, esto no representa una mejora como tal, más bien una modificación. En la figura 37 se observa el montaje de soportes y bastidores de la palca inferior, así mismo se evidencian las placas laterales y frontal ya incorporadas.

Figura 37. Ensamble de soportes y bastidores

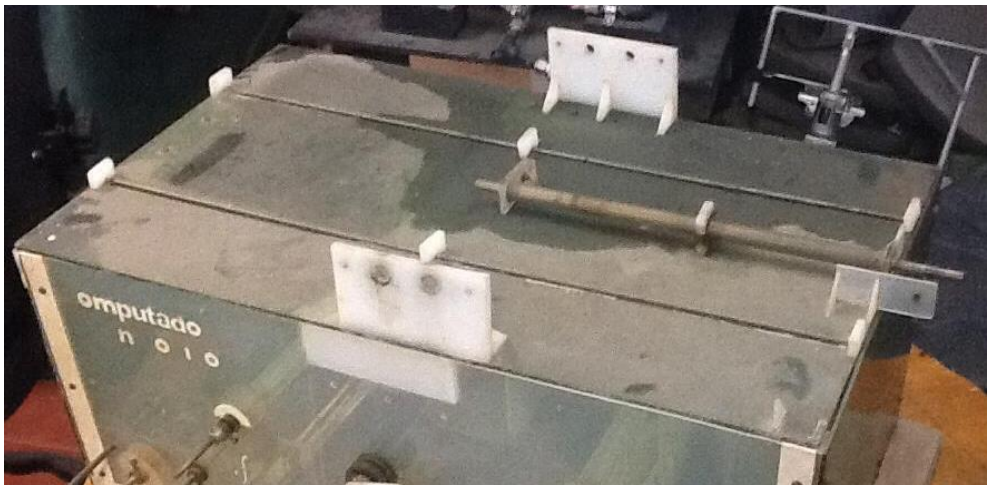


Fuente: Autores

En pro de la fabricación de las piezas faltantes del graficador, se recurre entonces al documento que acompaña el equipo [8] en donde se puede observar una imagen más detallada de los elementos que componen el mecanismo a reconstruir.

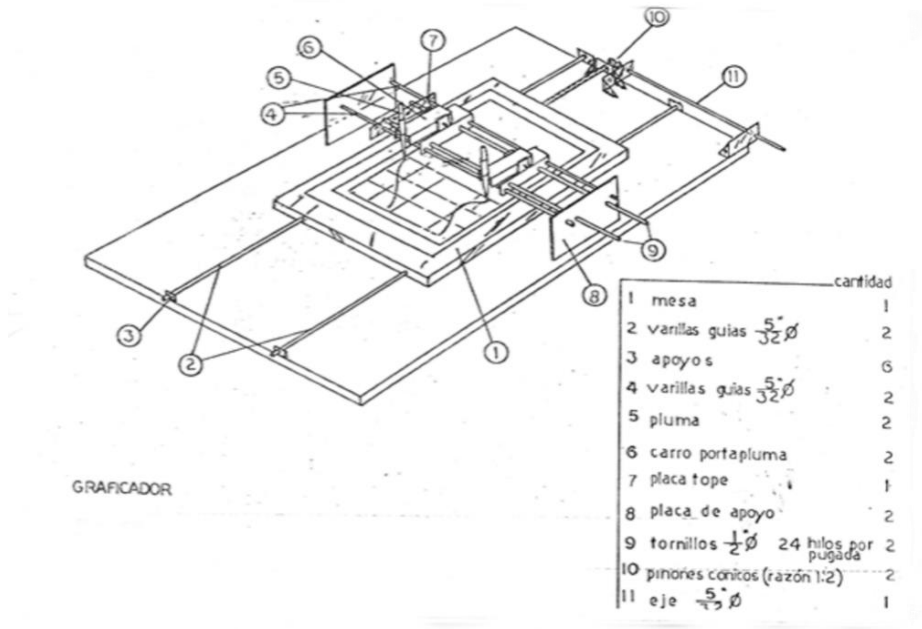
Siendo el graficador uno de los subsistemas más averiados del equipo, pues se encontró con la mayor cantidad de piezas faltantes y rotas, solo se rescatan las guías de la mesa, los soportes transversales que componen el mecanismo desplazamiento transversal de las guías y de los carros porta-pluma, el tornillo y la tuerca de desplazamiento longitudinal de la mesa tal como se ve en la figura 38. Cabe aclarar que los soportes transversales solo sirven como apoyo o patrón para la fabricación un par nuevo debido a que, al momento de retirarlos, la probabilidad de romperlos es muy alta y es más conveniente no contar con ellos como elemento de construcción.

Figura 38. Condición inicial del graficador



Fuente: Autores

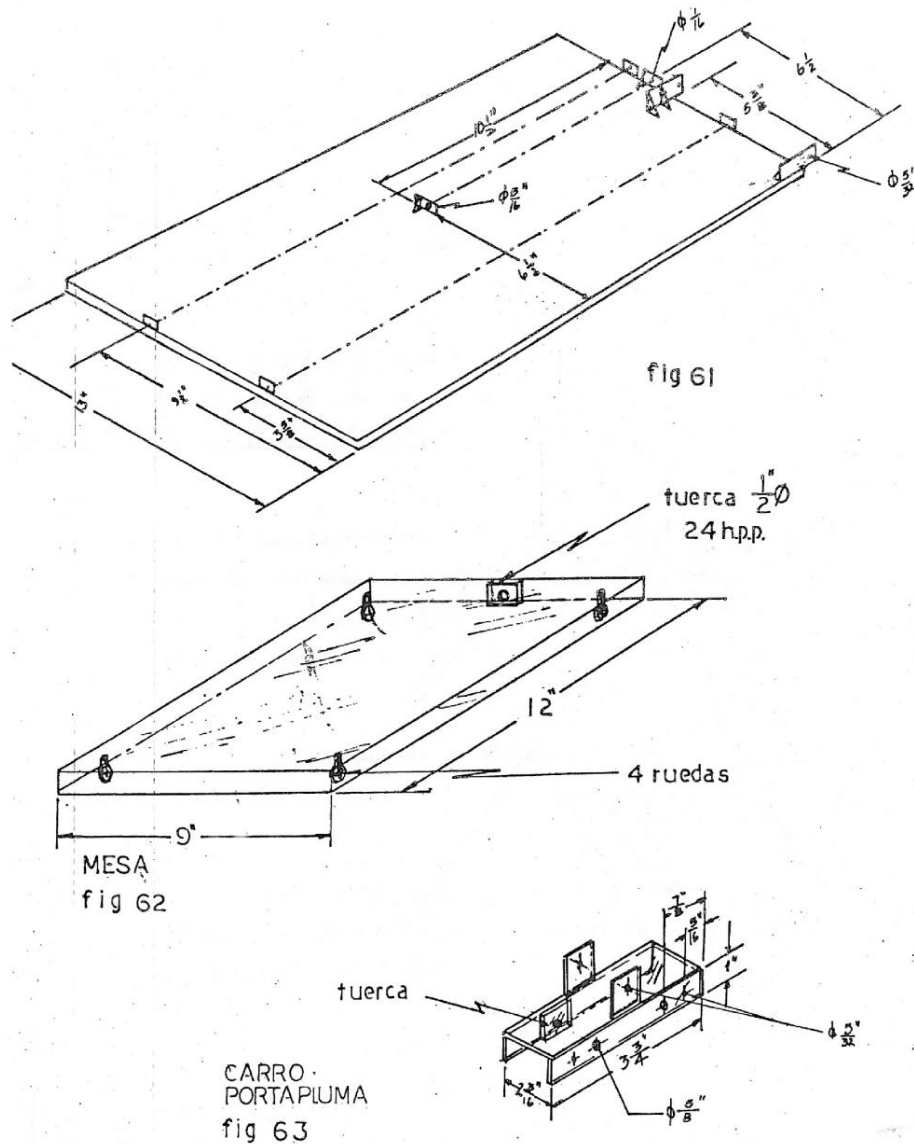
Figura 39. Esquema y listado de partes del mecanismo graficador



Fuente: [8]

En la figura 40 se observan tres imágenes isométricas en las que se detallan la placa base del graficador, la mesa y el carro porta-pluma con sus respectivas dimensiones.

Figura 40. Detalle de placa base del graficador, la mesa y el carro porta-pluma



Fuente: [8]

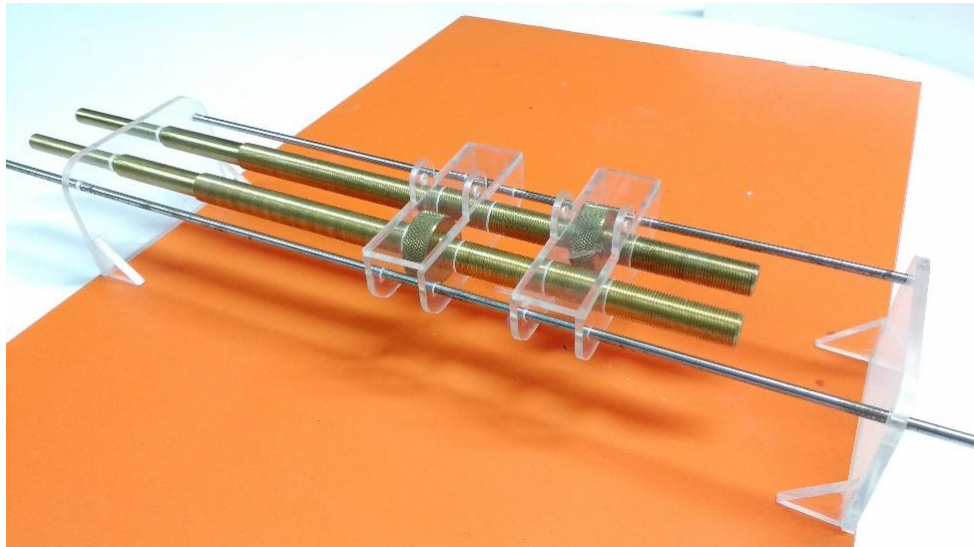
Para la fabricación de la placa base del graficador y del carro porta-pluma se hizo uso nuevamente del corte laser para las placas de acrílico y del vinilo cortado en *plotter* para garantizar la ubicación de los soportes de ejes y tornillos. En el caso de la mesa se utiliza

una lámina calibre 16 (espesor de 1.52mm) de acero inoxidable AISI 304 que es un acero aleado de grado alimenticio y resistente a la corrosión en ambientes de baja salinidad.

En el listado de partes que se muestra en la figura 38 en el numeral nueve, se designan dos tornillos con rosca especial de media pulgada de diámetro y veinticuatro hilos por pulgada ($\frac{1}{2}$ -24 UNF). Recurriendo a la originalidad del computador analógico, estos tornillos se fabricaron en bronce y por conveniencia se eligió el bronce-latón, ya que es el bronce más comercial y se utiliza en la industria para labores de baja exigencia lo que hace a este bronce un excelente candidato para la ejecución de este proyecto.

Nuevamente en referencia al listado de partes de la figura 38, para los números de parte dos, cuatro y once, se mencionan varillas y/o ejes de diámetro $\frac{5}{32}$ ". En busca de equilibrar el costo beneficio, en el mercado se encuentra la varilla de acero plata o varilla calibrada lisa SAE 1020 del diámetro correcto pero su costo es muy elevado, otra alternativa es el acero inoxidable AISI 304 con un diámetro de $\frac{3}{16}$ ", el cual tiene un poco más de diámetro, solo $\frac{1}{32}$ " (0.79mm) y su costo es un 70% menor, adicional a esto la resistencia a la corrosión de este acero, hace que sea la elección más acertada teniendo en cuenta que su diferencia de diámetros es irrelevante.

Figura 41. Preensamble carros porta-pluma



Fuente: Autores

La tecnología SLA (Stereolithography Apparatus) usa un láser de luz Ultra Violeta que se enfoca hacia un fotopolímero líquido haciendo un barrido sobre la superficie y curando el material, adicionando capas alrededor de 0.1mm de espesor (dependiendo del material y las dimensiones de lo que se desee imprimir) hasta obtener el volumen total de la pieza, logrando una tolerancia del modelo de 0.1 mm a 0.2 mm de precisión.

Inicialmente se produce un modelo 3D con un software de diseño CAD para este caso *AUTODESK INVENTOR* proporciona dicho modelo en formato. *ipt (Inventor part)*, luego se convierte el modelo a formato. *stl (Standard Triangulation Language)* con alta resolución y en las unidades dimensionales propias del modelo 3D para que el archivo conserve las relaciones de tamaño y la impresión resultante sea la deseada.

Posteriormente se cargan los archivos al computador de la impresora 3D, se realiza una configuración propia de la máquina como posicionamiento de la pieza a imprimir en la bandeja de construcción, acabado superficial, entre otras opciones. Después de realizar la configuración se da inicio a la impresión y de manera automática se construye el modelo durante un tiempo determinado (el tiempo de fabricación está dado por el tamaño y la complejidad del modelo).

Las piezas requeridas en este proyecto fueron logradas utilizando una impresora *Objet 24* (figura 42), la cual utiliza dos tipos de materiales (polímeros fotosensibles) para realizar la impresión 3D, se habla de *Verowhite fullcure 830* y *Fullcure 705* que son materiales de base acrílica para impresión de modelo y de soporte respectivamente.

Figura 42. Impresora 3D *Objet 24*



Fuente: Autores

Figura 43. Impresión de piezas con material de soporte



Fuente: Autores

Después del proceso de impresión (figura 43) se extraen las piezas para remover el material de soporte en una estación de lavado de agua a presión (figura 44) y poder obtener las piezas finalmente tal como se observan en la figura45.

Figura 44. Remoción de material de soporte



Fuente: Autores

Figura 44. Piezas sin material de soporte

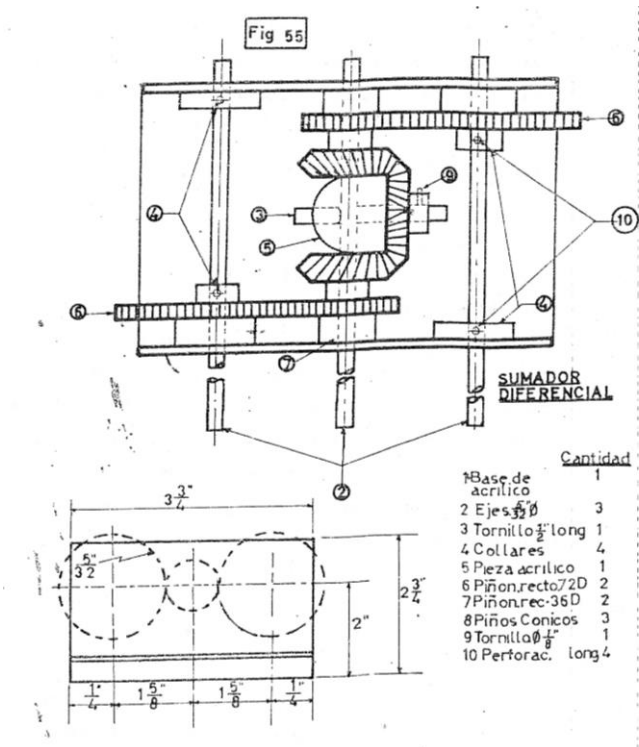


Fuente: Autores

En cuanto a la impresión de los demás componentes de transmisión de potencia, es decir poleas, piñones y discos de fricción pasan por el mismo proceso.

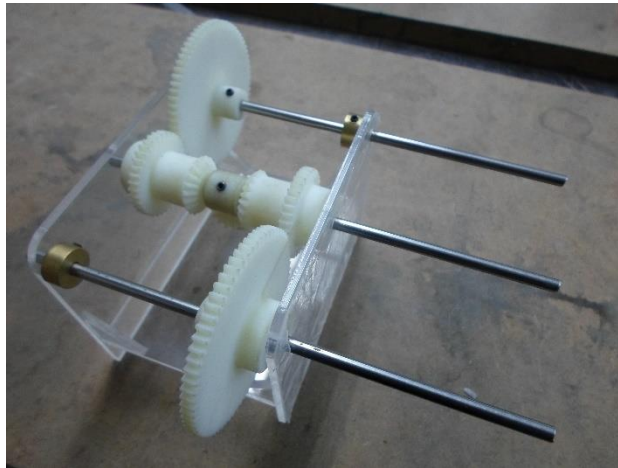
Para lograr la transmisión del sumador diferencial, se referenció la fabricación desde el documento original [8] tal como se ve en la figura 45, donde se detalla el ensamblaje y sus componentes, el resultado de la fabricación conjunta partes se evidencia en la figura 46.

Figura 45. Esquema y listado de partes sistema sumador



Fuente: [8]

Figura 46. Preensamble sistema sumador



Fuente: Autores

Los collares o topes mencionados en la lista de partes de la figura 45, se fabrican a partir de ejes en bronce-latón mediante un proceso de torneado como se puede ver en la figura 47.

Figura 47. Proceso de torneado de topes

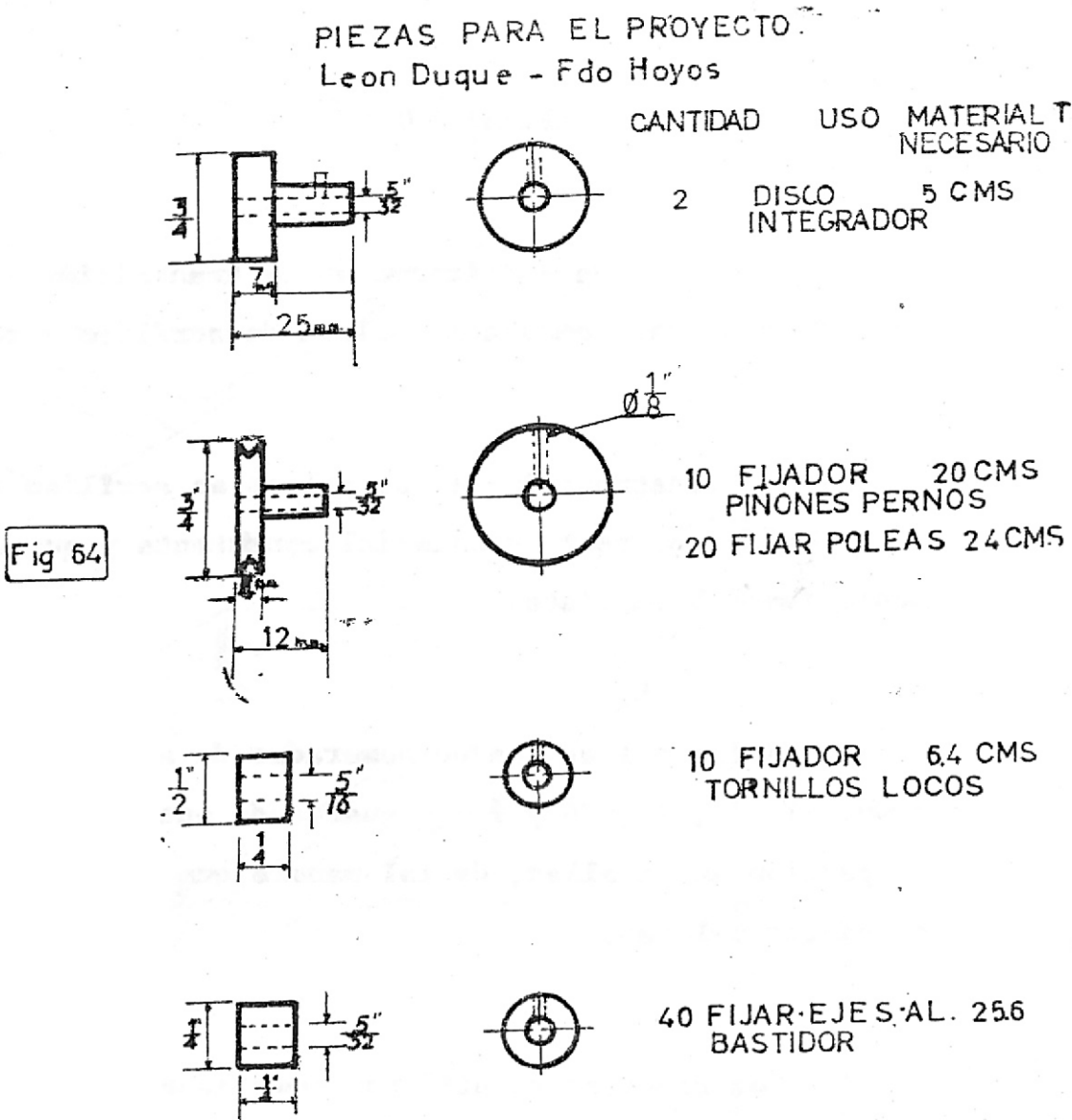


Fuente: Autores

Dado que las dimensiones de las poleas no son claras (figura 48), se notó que el diámetro exterior tenía relación con el nombre que recibían en el documento original [8], es decir la polea N° 4 tenía 4 cm de diámetro exterior y así sucesivamente con las demás poleas. Se fabricaron entonces acorde a esta relación. Adicionalmente el perfil de las poleas tampoco

estaba definido así que por cuestiones prácticas se estableció el uso de un perfil redondo para poder usar cordón de nitrilo como correa de transmisión entre poleas.

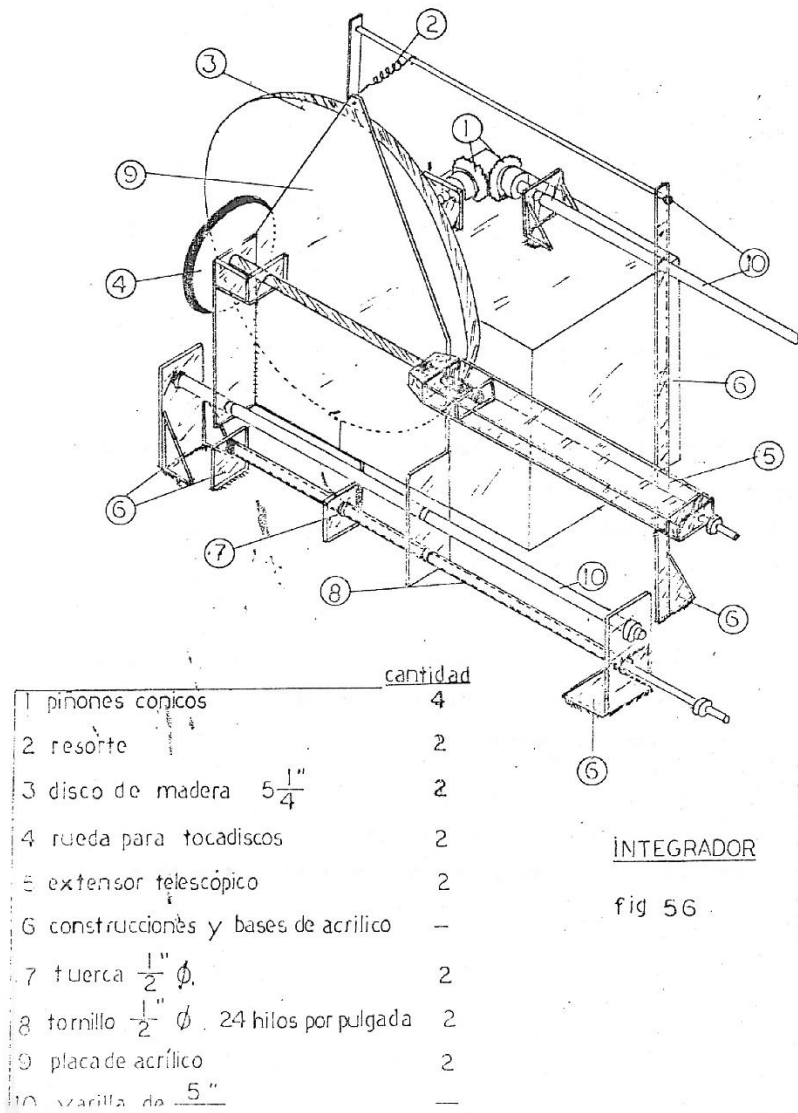
Figura 48. Información de componentes



Fuente: [8]

Dando continuidad a los mecanismos pendientes por fabricar, queda entonces el sistema de integración del equipo mostrado en la siguiente figura.

Figura 49. Esquema y listado de piezas sistema integrador



Fuente: [8]

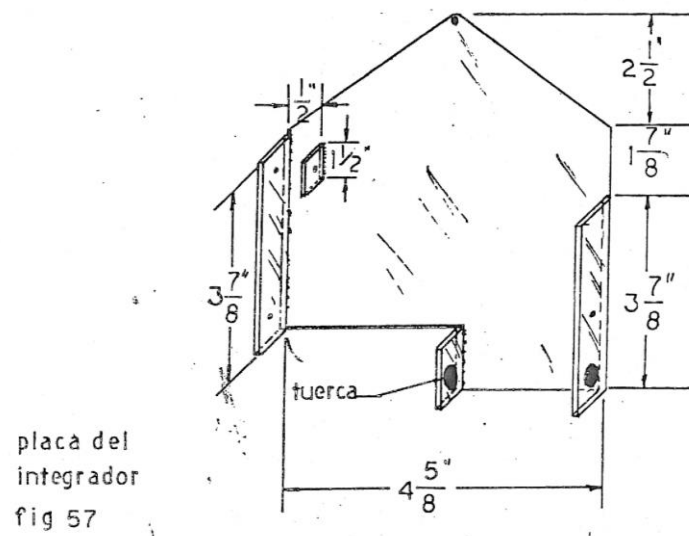
De este sistema se recuperaron únicamente dos tornillos (figura 50) con rosca especial de media pulgada de diámetro y veinticuatro hilos por pulgada ($\frac{1}{2}$ " - 24 UNF), las piezas restantes se fabricaron nuevas por impresión 3D; esto comprende los ejes telescópicos, las ruedas de salida del integrador o "rueda para tocadiscos" y piñones cónicos. La estructura (figuras 51 y 52) y el disco de fricción se lograron en placas de acrílico de 3 mm y 5 mm respectivamente.

Figura 50. Tornillos de $\frac{1}{2}$ " - 24UNF recuperados



Fuente: Autores

Figura 51. Esquema placa de integrador



Fuente: [8]

Figura 52. Componentes placa integrador



Fuente: Autores

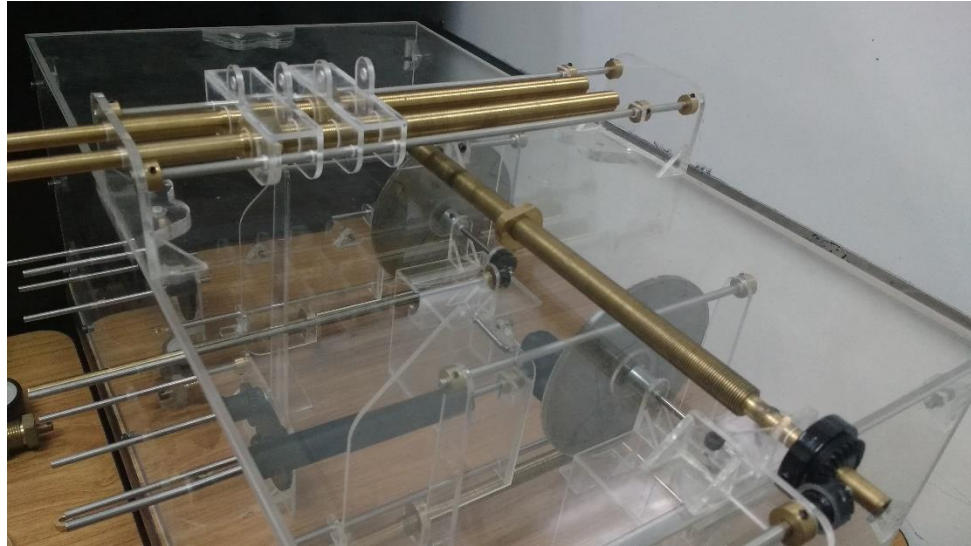
Teniendo ya todos los elementos y mecanismos listos, se ensambló de manera parcial (figuras 53 y 54), con la finalidad de realizar una verificación de funcionamiento en pro de cualquier modificación que fuese necesaria y/o conveniente en este punto del desarrollo.

Figura 53. Ensamble parcial frontal



Fuente: Autores

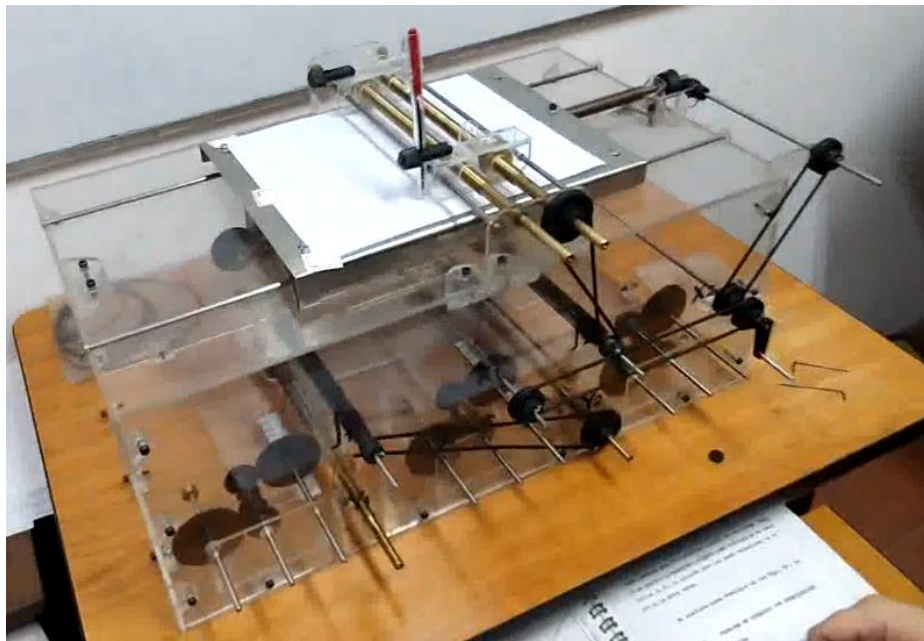
Figura 54. Ensamble parcial superior



Fuente: Autores

Finalmente, en la figura 55 se observa el computador analógico mecánico totalmente ensamblado y funcional.

Figura 55. Ensamble final



Fuente: Autores

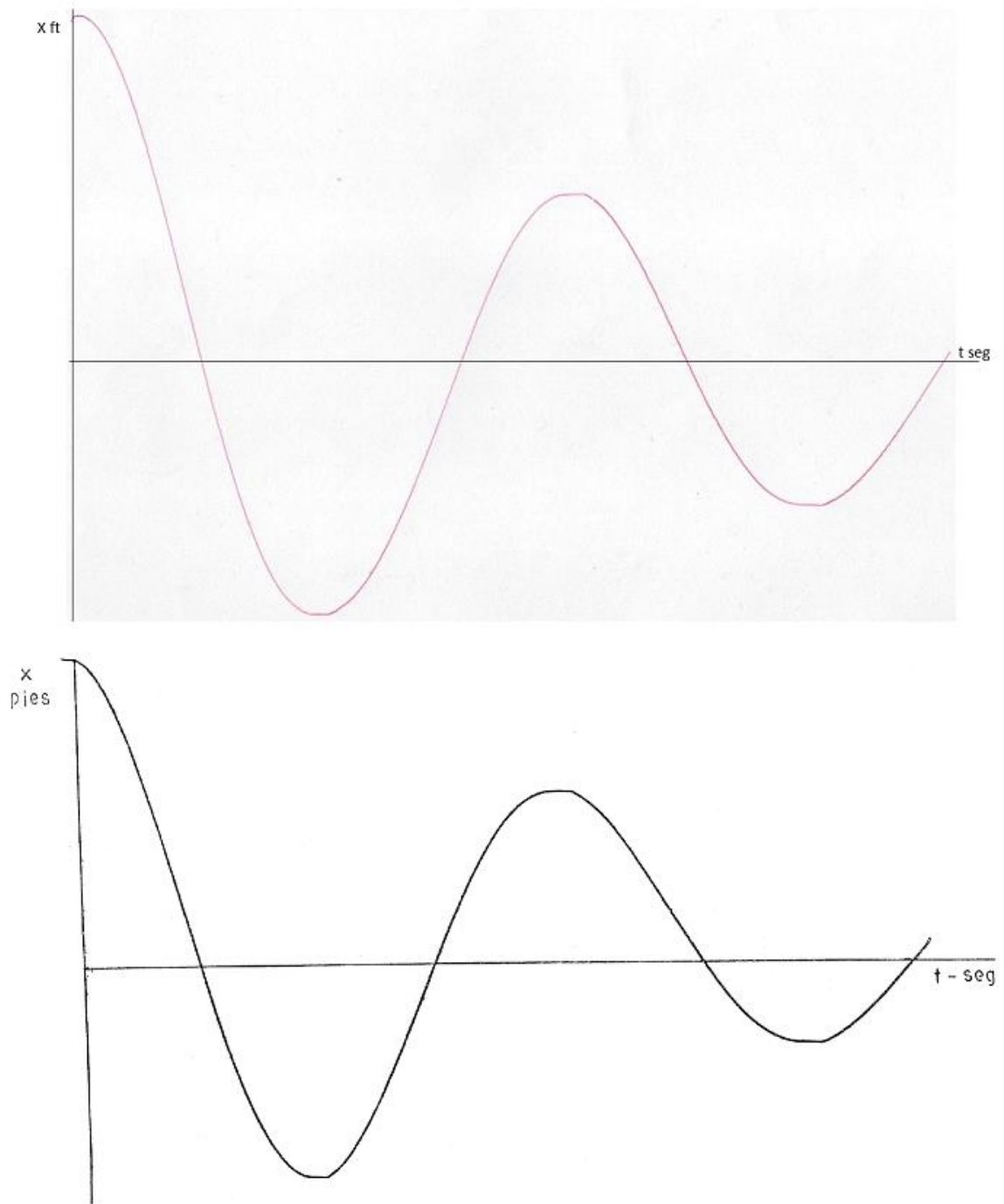
5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Las pruebas de funcionamiento del mecano empezaron desde la observación de la operación, de los diferentes mecanismos por separado. Dichas observaciones conllevaron tanto a la realización de diferentes ajustes de acoplamiento y disposición de los componentes como a operaciones de lubricación. Consecutivamente se empezó uniendo los diferentes mecanismos entre sí a través de las distintas configuraciones planteadas en las prácticas propuestas, actividad que conllevó a la realización de ajustes de tensión en las correas empleadas en las diferentes prácticas y a arreglos en las disposiciones de las poleas empleadas todo con el fin de eliminar las interferencias y llegar a un funcionamiento apropiado del computador analógico.

Durante la ejecución de las prácticas planteadas se determinó la necesidad de realizar cambios en algunos sentidos de giro de poleas con el fin de encontrar una configuración adecuada para la realización de ellas que nos aportaran una operación más fluida del computador y una obtención de resultados mejor dispuesta para su comparación con los resultados obtenidos en la operación del computador analógico original.

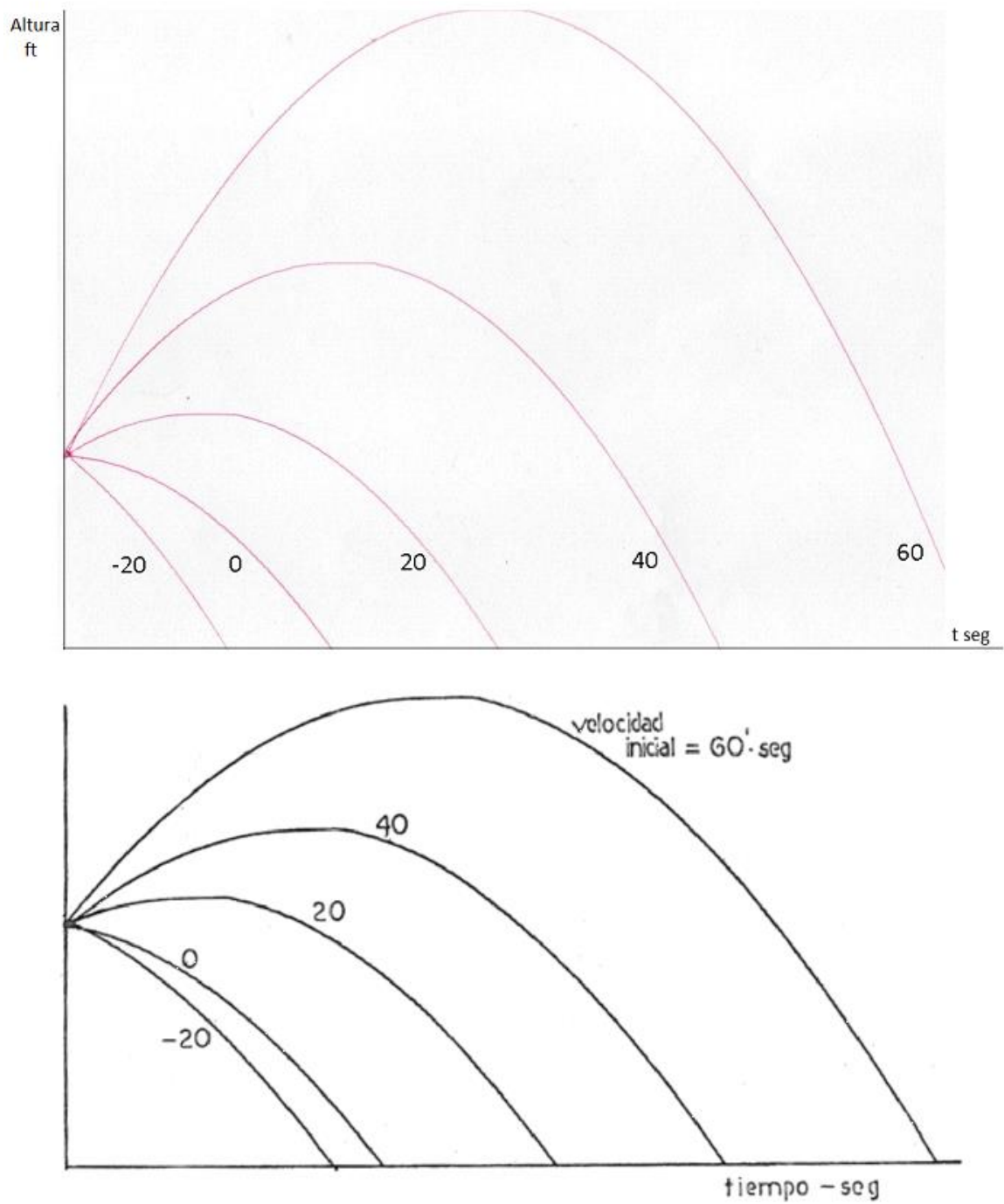
Durante la comparación de los resultados obtenidos en las diferentes prácticas con el computador analógico restaurado y las obtenidas con el computador analógico original plasmadas en el documento que lo acompaña, se encontró que las tendencias en las diferentes gráficas son iguales con pequeñas discrepancias en su forma las cuales se adjudican a la reducción del margen de error en el computador restaurado, esto dado por los procesos de manufactura empleados en la fabricación de los diferentes componentes ya que en comparación se utilizaron métodos más precisos tales como corte láser e impresión 3D mientras que muchos componentes originales se fabricaron por métodos artesanales, los cuales no cumplían ni garantizaban en su totalidad con los parámetros de diseño. Otro aspecto que se confirió a la reducción del margen de error fue la calidad y estado de los materiales empleados, estos evidenciados durante la restauración como es el caso de los diferentes ejes los cuales se encontraban deformados y el de los tornillos de entrada Y de los integradores, los cuales fueron enderezados por motivos semejantes. Estas comparaciones se pueden observar a continuación en las figuras número 56, 57 y 58, donde las gráficas superiores corresponden a las obtenidas por el computador analógico restaurado contra las gráficas logradas por el computador analógico original, las cuales corresponden a las prácticas de vibración con amortiguación viscosa, problema sobre caída libre y función entrada paso respectivamente.

Figura 56. Comparativo resultados vibración con amortiguación viscosa



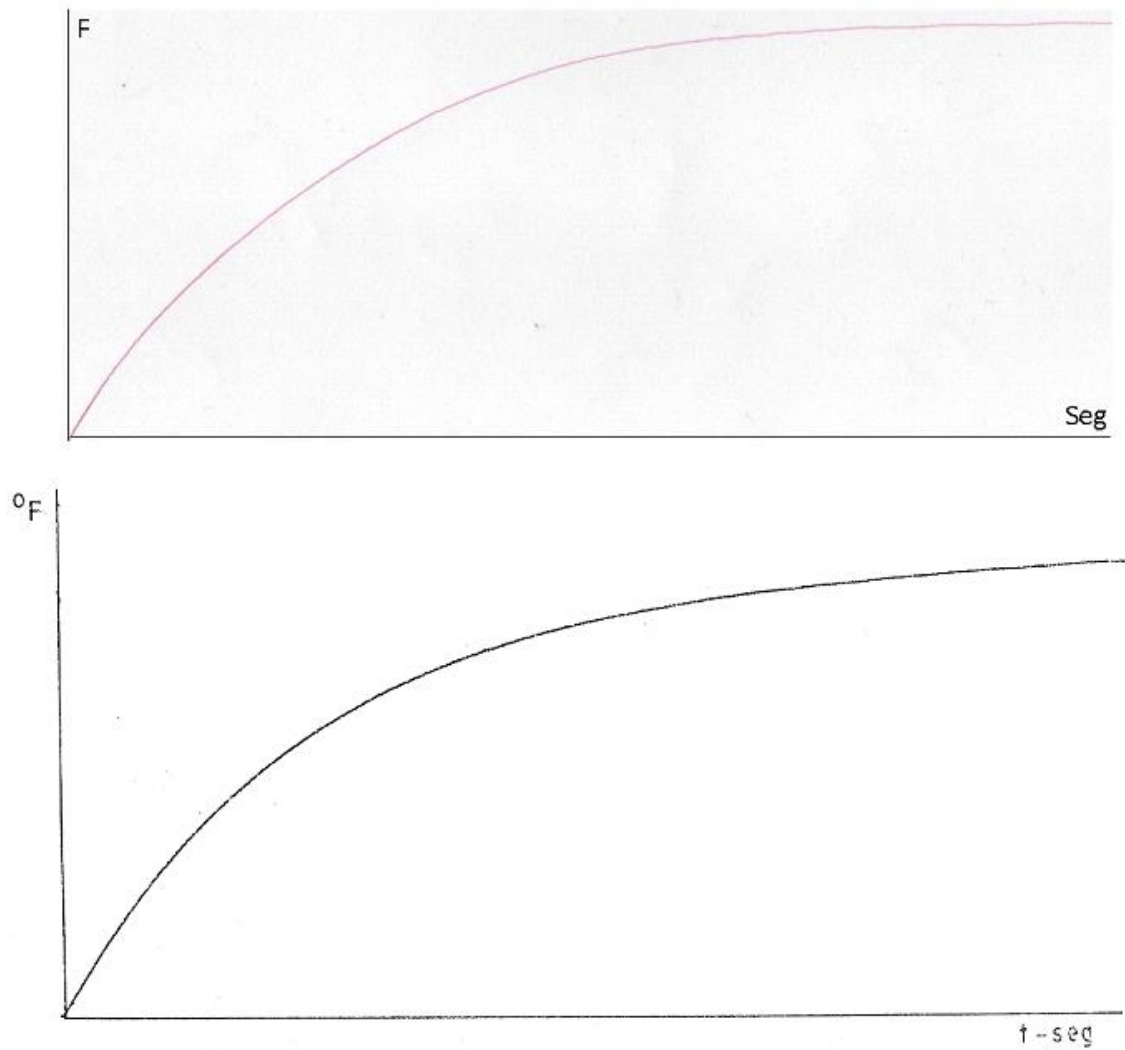
Fuente: Autores, [8]

Figura 57. Comparativo resultados problema sobre caída libre



Fuente: Autores, [8]

Figura 58. Comparativo resultados función entrada paso



Fuente: Autores, [8]

6. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PRÁCTICAS DEL COMPUTADOR ANALÓGICO MECÁNICO, PUESTA A PRUEBA Y CORRECCIONES.

6.1 PROBLEMA FUNCIÓN ENTRADA PASO

En este ejercicio se simula un instrumento sujeto a una función de entrada tipo paso. El instrumento a simular que cuenta con características de primer orden será una termocupla.

La ecuación a programar será la desarrollada a continuación en las formulas (8), (9) y (10):

$$dx/dt = F(t) - X \quad (8)$$

$$0,01 \, dx/dt = F(t) - X \quad (9)$$

$$dx/dt = 100F(t) - 100X \quad (10)$$

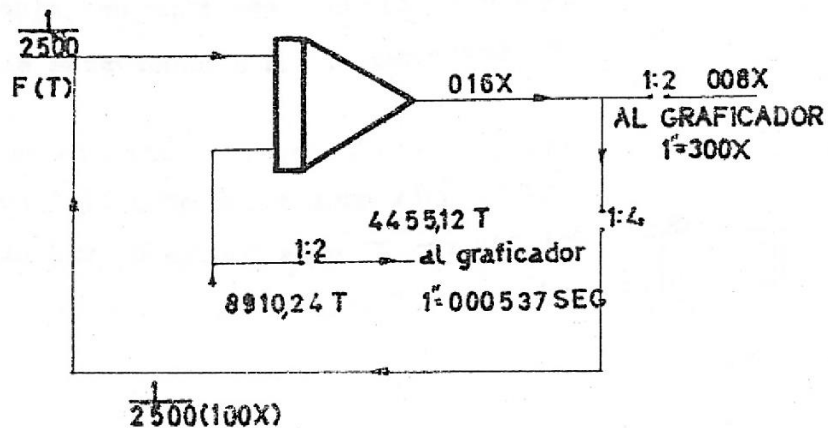
donde,

X es la temperatura indicada;

F(t) la fuerza electromotriz en función del tiempo;

Se consideraron **S1 = 24** y **S2 = 1/2500** como los factores de escala apropiados, se encuentra entonces en la figura número 59 el diagrama esquemático que representa el problema a tratar en el cual la primera función de entrada será una elevación rápida de temperatura de unos 1000°F, esto es 1000 unidades de X. la condición inicial del integrador será 100 F(t) = 100 x 100/2500 = 40 vueltas del eje que desplaza el carro de la rueda.

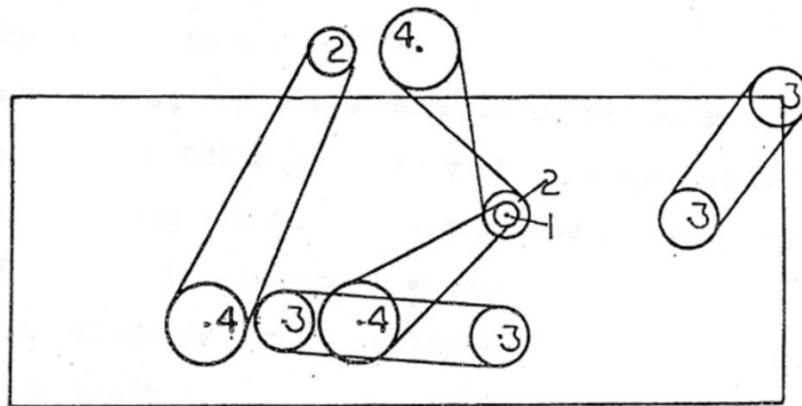
Figura 59. Diagrama esquemático función entrada paso



Fuente: [8]

Ahora para iniciar la programación de este problema en el computador es necesario ir al panel frontal para realizar la instalación de las diferentes poleas y correas como se muestra de manera esquemática en la figura número 59. Los números 1, 2, 3 y 4 que se muestran en la figura se refieren al tamaño de las poleas usadas. Cabe aclarar que las poleas número 2 y número 4 que van montadas sobre los tornillos de desplazamiento transversal del graficador, así como se muestra en la figura número 60, realmente deben ser ubicadas sobre el mismo eje, en este caso sobre el tornillo izquierdo ya que de otro modo la programación no arroja la gráfica de manera correcta. Se supone entonces que los autores hicieron esta disposición en la imagen por facilidad y/o comodidad visual.

Figura 60. Distribución de correas y poleas función entrada paso

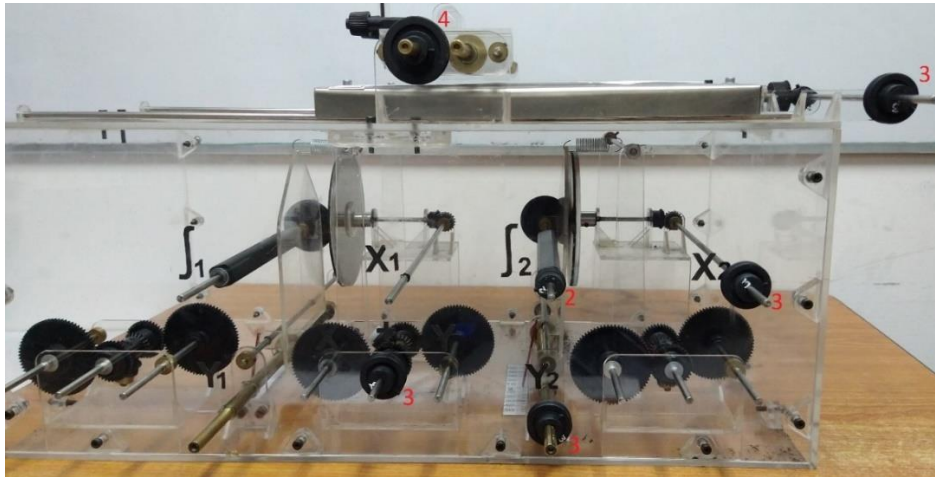


Fuente: [8]

El primer paso es montar las poleas correspondientes en sus respectivos ejes, como hay ejes que portan más de una polea y las correas no deben tener contactos entre sí, esto se hace dividiendo esta operación en dos planos diferentes de montaje, paralelos al panel frontal.

En el primer plano se monta un juego de poleas compuesto por dos poleas número 2, cuatro poleas número 3 y una polea número 4. una polea número 2 es ubicada en el eje correspondiente al integrador 2. Una de las poleas número 3 es ubicada en el eje correspondiente a X2, la siguiente polea número 3 sobre el eje de entrada a la mesa del graficador, otra de las poleas número 3 se acopla al eje correspondiente a Y2 y la última polea número 3 es ajustada en el eje de salida del sumador. la polea número 4 se monta en el eje izquierdo del carro graficador. Este primer plano se observa a continuación en la figura número 61.

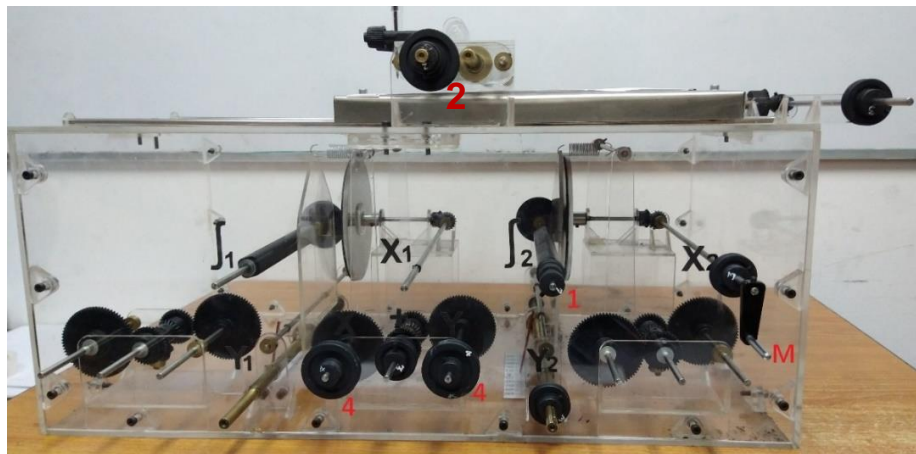
Figura 61. Plano de montaje 1



Fuente: Autores

En el segundo plano se monta un siguiente juego de poleas compuesto por una polea número 1, dos poleas número 4 y finalmente la manivela con la cual se da inicio al movimiento sobre el eje del tiempo. la polea número 1 es ubicada en el eje correspondiente al integrador 2. Una de las poleas número 4 se acopla a la entrada X del mecanismo sumador y la otra polea número 4 es ensamblada en el eje X del mecanismo sumador y la polea número 2 va en el eje izquierdo del carro graficador. Por último, se acopla la manivela sobre el eje correspondiente a X2. Este segundo plano se observa a continuación en la figura número 62.

Figura 62. Plano de montaje 2

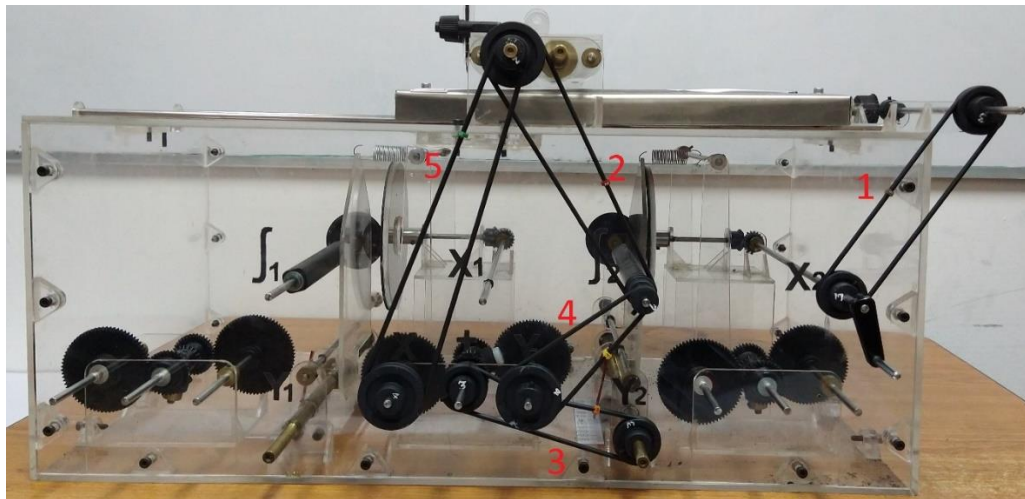


Fuente: Autores

El siguiente paso es realizar las conexiones entre poleas a través de las correas las cuales se encuentran numeradas y separadas para esta práctica en una bolsa de cierre hermético, cabe aclarar que la numeración de las correas corresponde al orden en que se deben de montar de derecha a izquierda, adicionalmente para la finalización de la práctica se deben colocar las marcas y /o numeración a cada correa, retirar y guardar en su respectiva bolsa para evitar confusiones.

La correa número 1 va a realizar la conexión entre la polea número 3 de X2 y la polea número 3 del eje de entrada de la mesa del graficador montadas en el primer plano, la correa número 2 ejecutará la conexión entre la polea número 2 del integrador número 2 y la polea número 4 del carro graficador, la correa número 3 efectuará la conexión entre la polea número 3 de la salida del sumador y la polea número 3 del eje correspondiente a Y2. La correa número 4 ejecutará la conexión entre la polea número 1 del integrador 2 y la polea número 4 del eje de entrada Y del sumador por último la correa número 5 efectuará la conexión entre la polea número 4 del eje de entra X del sumador y la polea número 2 del eje izquierdo del carro graficador. Este paso puede ser observado en la siguiente figura número 63.

Figura 63. Montaje de correas y poleas



Fuente: Autores

En este punto de la práctica ya se tienen realizados todos los acoples de las poleas con sus respectivas conexiones y también el acople de la manivela. El siguiente paso es llevar el computador analógico a sus condiciones iniciales para empezar la operación del mismo. Se empieza por fijar la hoja en la mesa del graficador. El carro porta pluma debe de estar

ubicado en el extremo izquierdo frontal de la mesa del graficador y la pluma asentada suavemente sobre la hoja. El integrador número 2, se debe ubicar en -54. En este momento ya han garantizado todas las condiciones iniciales para efectuar la operación del computador. Para ello se debe girar la manivela a un ritmo constante en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

Al finalizar la practica el resultado obtenido es una gráfica como la que se observa en la figura número 64, la cual muestra que después de un tiempo igual a una constante de tiempo 0,01, la temperatura es el 63% de la temperatura final, y después de dos constantes de tiempo (2,02 segundos) la temperatura alcanza el 86% de la temperatura final. Esto es una propiedad de los sistemas de instrumentos de primer orden.

Figura 64. Grafica obtenida función entrada paso



Fuente: Autores

6.2 PROBLEMA SOBRE CAÍDA LIBRE

Cuando se habla de caída libre se refiere a un movimiento que se debe únicamente a la influencia de la gravedad en el cual los cuerpos poseen una aceleración dirigida hacia abajo. En este caso en particular expondremos el problema de la piedra que cae desde un edificio. Se supone que un edificio del cual cae la piedra tiene una altura de **100 ft** y la posición de la piedra se solicita como función del tiempo después de soltarla.

La aceleración **-g** es entregada por el eje **Y** del integrador numero 1 un factor de escala útil es **S2 = 1**, ya que una vuelta del eje Y representa un ft/s² de aceleración, entonces la condición inicial del eje Y del integrador número 1 se ubica -32.2 vueltas en sentido opuesto al de las manecillas del reloj. Esta operación mueve la rueda del integrador a su posición

inicial. Estas vueltas se cuentan a partir de la posición 0 de la rueda la cual es el centro del disco.

Para el tiempo **X** se debe seleccionar un factor de escala el cual depende del problema en particular que se esté resolviendo. Para este problema se encuentra conveniente **S1 = 44,5512** ya que un factor de escala mucho menor produciría una salida menor aumentando el error y un factor de escala mayor supondría un tiempo mayor para su solución en el computador. En suma, cuando se hace una conexión directa del eje del tiempo al graficador el resultado de la gráfica tiene una escala de 1 pulgada = 1,077412 segundos. Se determina la salida del integrador de la siguiente manera:

$$S3 = \frac{S1 \cdot S2}{24 \times r} = \frac{(44,5512)(1)}{22,2756} = 2$$

De aquí que el eje de salida voltee dos veces por cada ft/s de velocidad.

Igualmente es provechoso aumentar el torque disponible haciendo una reducción de la velocidad del integrador. Una reducción 1:4 se emplea a la salida del integrador número 1 y a la entrada del integrador número 2.

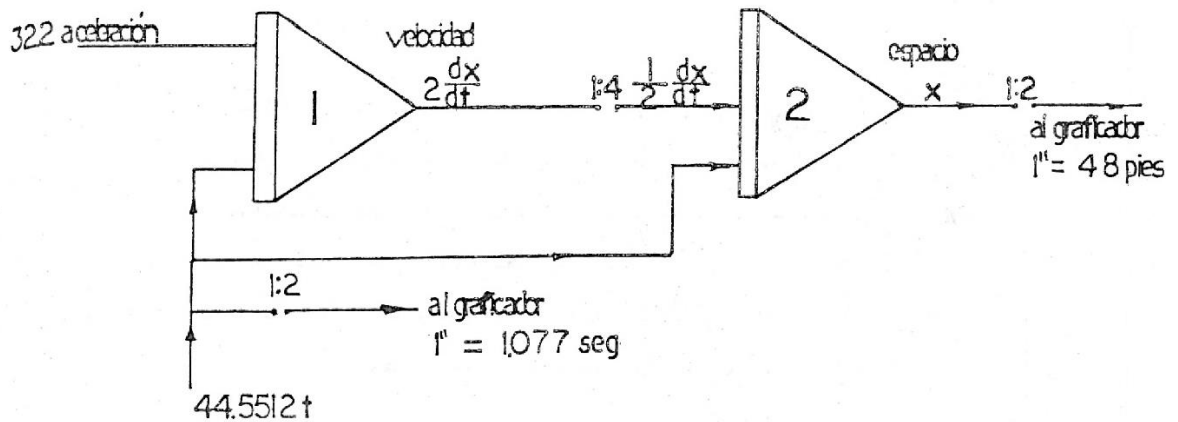
Como para el integrador número 2 la escala del tiempo es la misma la salida llega a ser:

$$\frac{(S1)^2}{(24^2)(m)(r^2)} = \frac{(44,5512)^2(1)}{(24^2)(4)(0,92815^2)} = 1$$

Esta salida es el desplazamiento requerido S, con el factor de 1 que indica que una vuelta del eje de salida del integrador número 2 es equivalente a un pie de desplazamiento. Ya que la velocidad inicial es cero para esta parte del problema, el desplazamiento Y del integrador número 2 se posiciona inicialmente en su posición 0 de la rueda del integrador.

En la figura número 65 se observa un diagrama esquemático del problema el cual muestra la salida del desplazamiento conectada al eje Y del graficador.

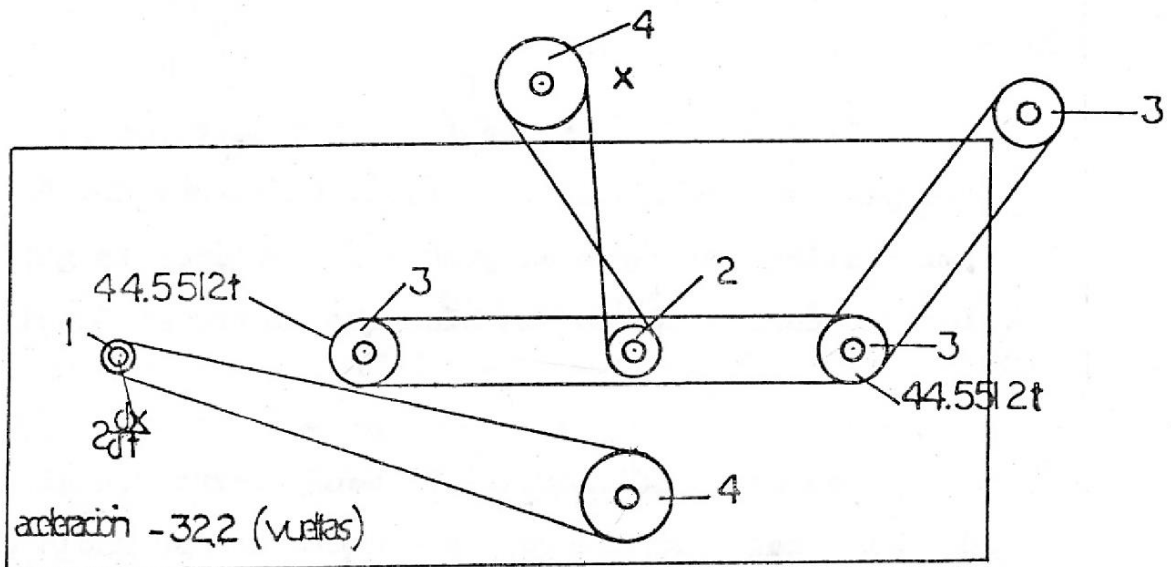
Figura 65. Diagrama esquemático caída libre



Fuente: [8]

Ahora para iniciar la programación de este problema en el computador es necesario ir al panel frontal para realizar la instalación de las diferentes poleas y correas como se muestra de manera esquemática en la figura número 66. Los números 1, 2, 3 y 4 que se muestran en la figura se refieren al tamaño de las poleas usadas.

Figura 66. Distribución de correas y poleas caída libre.

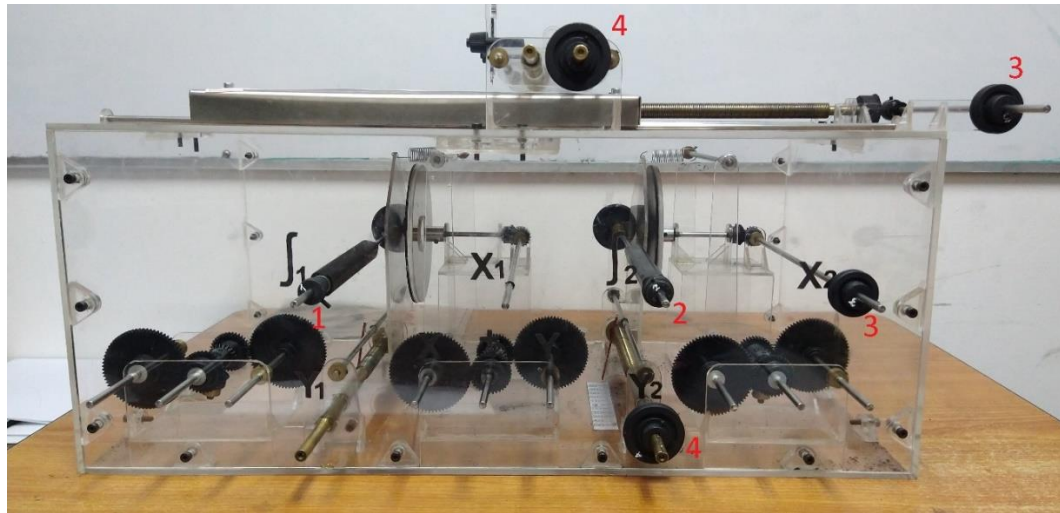


Fuente: [8]

El primer paso es montar las poleas correspondientes en sus respectivos ejes, como hay ejes que portan más de una polea y las correas no deben tener contactos entre si esto se hace dividiendo esta operación en dos planos de montaje diferentes.

En el primer plano se monta un juego de poleas compuesto por una polea número 1, una polea número 2, dos poleas número 3 y dos poleas número 4. La polea número 1 va montada sobre el eje del integrador número 1. la polea número 2 es ubicada en el eje correspondiente al integrador 2. Una de las poleas número 3 es ubicada en el eje correspondiente a X2 y la siguiente polea número 3 sobre el eje de entrada a la mesa del graficador. Una de las poleas número 4 se acopla al eje correspondiente a Y2 y por último en este plano se ensambla la otra polea número 4 en el eje derecho del carro graficador. Este primer plano se observa a continuación en la figura número 67.

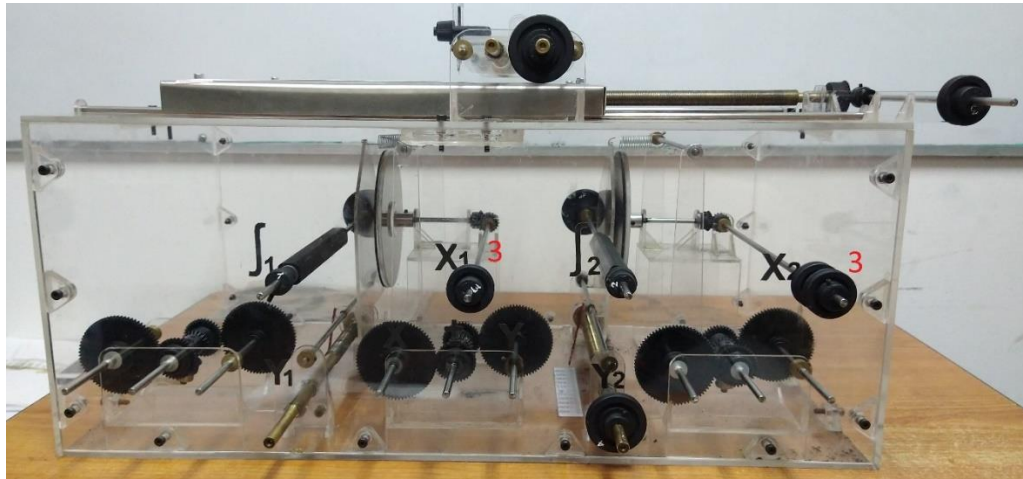
Figura 67. Plano de montaje 1



Fuente: Autores

En el segundo plano se ubica un siguiente juego de poleas compuesto por dos poleas número 3 y finalmente la manivela con la cual se da inicio al movimiento sobre el eje del tiempo. Una de las poleas número 3 es ubicada en el eje correspondiente a X1 y la siguiente polea número 3 sobre el eje correspondiente a X2. Sobre este mismo eje se ancla la manivela. Este segundo plano se observa a continuación en la figura número 68.

Figura 68. Plano de montaje 2

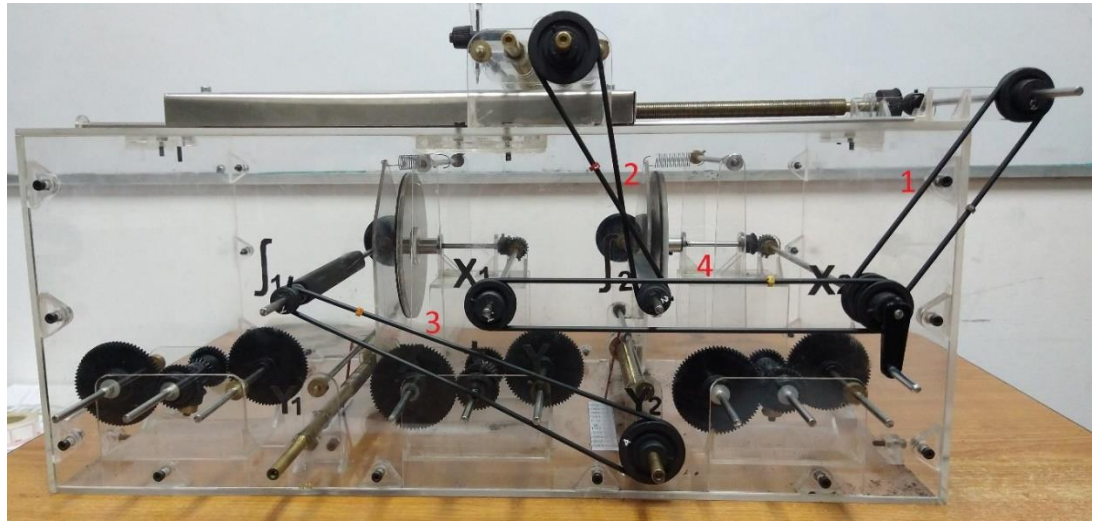


Fuente: Autores

El siguiente paso es realizar las conexiones entre poleas a través de las correas las cuales se encuentran numeradas y separadas para esta práctica en una bolsa de cierre hermético, cabe aclarar que la numeración de las correas corresponde al orden en que se deben de montar de derecha a izquierda, adicionalmente para la finalización de la práctica se deben colocar las marcas y /o numeración a cada correa, retirar y guardar en su respectiva bolsa para evitar confusiones.

La correa número 1 va a realizar la conexión entre la polea número 3 de X2 y la polea número 3 del eje de entrada de la mesa del graficador montadas en el primer plano, la correa número 2 ejecutara la conexión entre la polea número 2 del integrador número 2 y la polea número 4 del carro graficador en esta conexión. Es muy importante que la correa se encuentre cruzada con el fin de obtener el sentido de giro apropiado para la ejecución de esta práctica, la correa número 3 efectuará la conexión entre la polea número 1 del integrador 1 y la polea número 4 de Y2 también correspondiente al primer plano de poleas y por último la correa número 4 efectúa la conexión entre la polea número 3 de X1 y la polea número 3 de X2 montadas en el segundo plano de poleas. Este paso puede ser observado en la siguiente figura número 69.

Figura 69. Montaje de correas y poleas

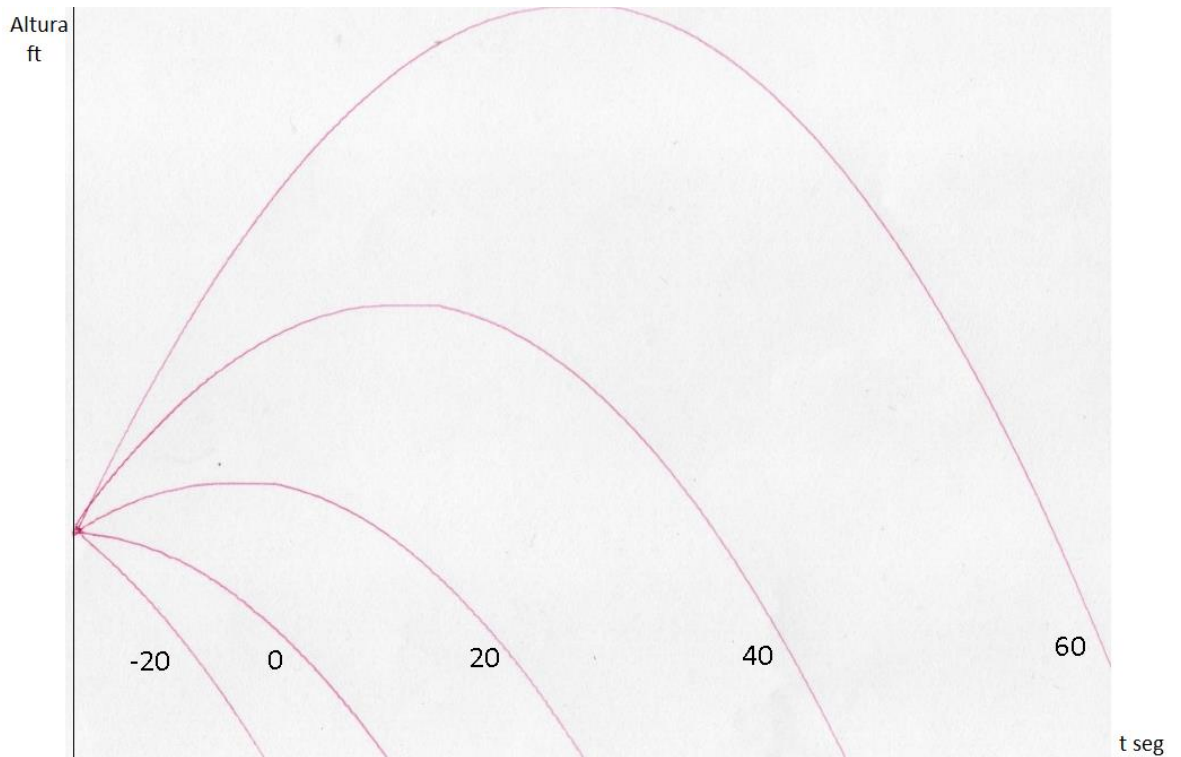


Fuente: Autores

En este punto de la práctica ya se tienen realizados todos los acoples de las poleas con sus respectivas conexiones y también el acople de la manivela. El siguiente paso es llevar el computador analógico a sus condiciones iniciales para empezar la operación del mismo. Se empieza por fijar la hoja en la que vamos a graficar en la mesa del graficador. El carro porta pluma debe de estar ubicado en el extremo izquierdo central de la mesa del graficador y la pluma asentada suavemente sobre la hoja. El integrador número 1 se deber ubicar en -32,2 el cual concierne al valor de la gravedad mientras que el integrador número 2 se ubica en -20, 0, 20, 40, y 60 que corresponden a diferentes valores iniciales de velocidad. En este momento ya se ha garantizado todas las condiciones iniciales para efectuar la operación del computador. Para ello se debe girar la manivela a un ritmo constante en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

Al finalizar la practica el resultado obtenido, es una gráfica como la que se observa en la figura número 70, la cual muestra los resultados para una salida inicial cero.

Figura 70. Grafica obtenida caída libre



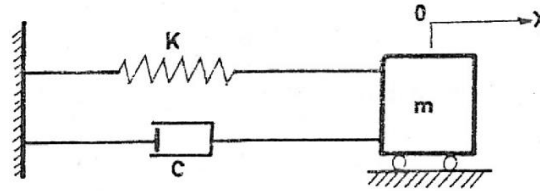
Fuente: Autores

6.3 PROBLEMA DE VIBRACION CON AMORTIGUACION VISCOSA

Un movimiento oscilatorio que va decayendo o es disipado en una partícula es conocido como vibración amortiguada y es muy conocido en sistemas eléctricos y mecánicos. El problema a tratar considera el caso de un resorte, masa y sistema de amortiguación mecánico exclusivamente. en el cual la fuerza que en él se genera es proporcional a la velocidad. Esto es lo que se llama amortiguación viscosa.

En el sistema mecánico que se observa en la figura número 71, el cual consiste en el esquema de un cuerpo de masa m , que se encuentra unido a un soporte mediante un resorte de constante k : **1 lb/pie**. Y conectado a un amortiguador cuya constante es c , que produce una fuerza proporcional a la velocidad del pistón.

Figura 71. Esquema de vibración con amortiguación viscosa



Fuente: [8]

Si a este cuerpo se le suministra una velocidad horizontal inicial, desplazamiento o incluso ambos, oscilará entonces hacia adelante y hacia atrás. La amplitud de esta vibración decrecerá debido a la energía que disipa el sistema. Entonces las fuerzas horizontales actuantes son, la fuerza del resorte la cual depende del aumento o disminución de la contracción del resorte, KX , y la fuerza del amortiguador que es dependiente de la velocidad, $c \, dx/dt$, en el que dx/dt es la velocidad en un instante. Si la mesa es desplazada hacia la derecha se obtiene X positivo, entonces las fuerzas del resorte y el amortiguador operaran en sentido opuesto.

Partiendo de la segunda ley de newton se encuentran las ecuaciones (11) y (12) que gobierna este movimiento así:

$$-KX - c \, dx/dt = ma = m \, d^2x/dt^2 \quad (11)$$

$$d^2x/dt^2 = (-c/m) \, dx/dt - (K/m) X \quad (12)$$

donde,

KX es la fuerza del resorte;

$c \, dx/dt$ es la fuerza del amortiguador en un instante;

m es la masa;

a es la aceleración;

En el estudio de las vibraciones se observa que esta ecuación puede expresarse así:

$$d^2x/dt^2 = -2 \, \xi \, w \, dx/dt - w^2 x \quad (13)$$

donde,

ξ es el coeficiente de amortiguación

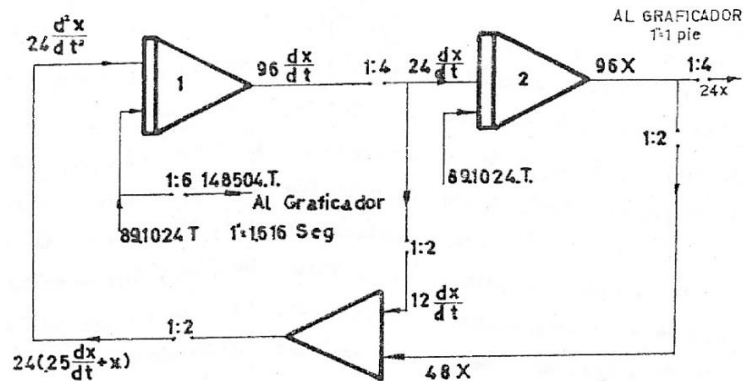
w es la frecuencia natural de la vibración en rad/s

en el problema a tratar $w = 1$ por conveniencia y $\xi = 0,125$ quedando entonces la ecuación 13 expresada de la siguiente manera:

$$d^2x/dt^2 = -0,250 dx/dt - x$$

Para este problema en particular durante la operación del computador analógico, la segunda derivada (aceleración) se entregará al integrador 1, el cual generará la primera derivada (velocidad) esta será proporcionada por el integrador 2 para producir el desplazamiento en x . La velocidad y el desplazamiento son sumadas en sus correctas proporciones en el mecanismo sumador y dicho resultado es entregado al integrador 1 como se hizo con la aceleración, dicha operación se observa en la figura número 72 en un esquema en el que los factores de escala son $S1 = 89,1024$ y $S2 = 24$. En este caso el tornillo de conducción del integrador 1 se desplace 48 vueltas ($S2 = 24$) y el computador empieza su operación haciendo girar con la manivela los ejes del tiempo.

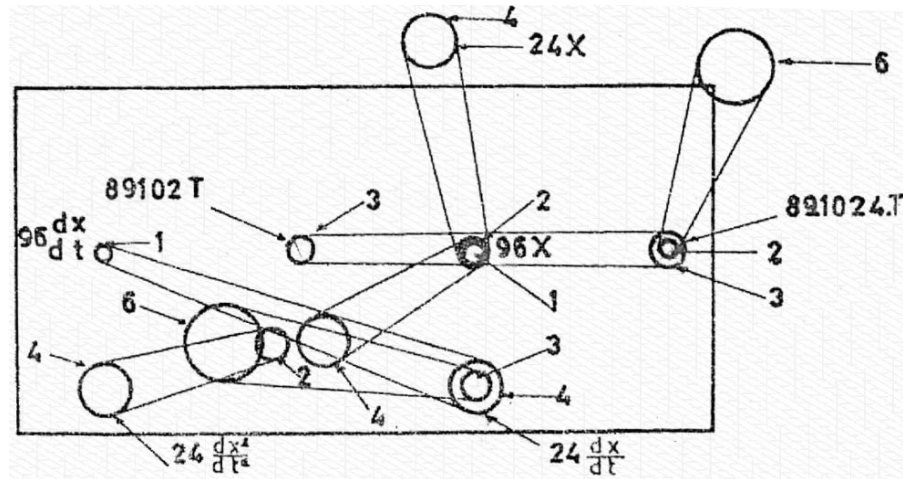
Figura 72. Diagrama esquema de vibración con amortiguación viscosa



Fuente: [8]

Ahora para iniciar la programación de este problema en el computador nos dirigimos al panel frontal para realizar la instalación de las diferentes poleas y correas como se muestra de manera esquemática en la figura número 73. Los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6 que se muestran en la figura se refieren al tamaño de las poleas usadas.

Figura 73. Distribución de correas y poleas vibración con amortiguación viscosa

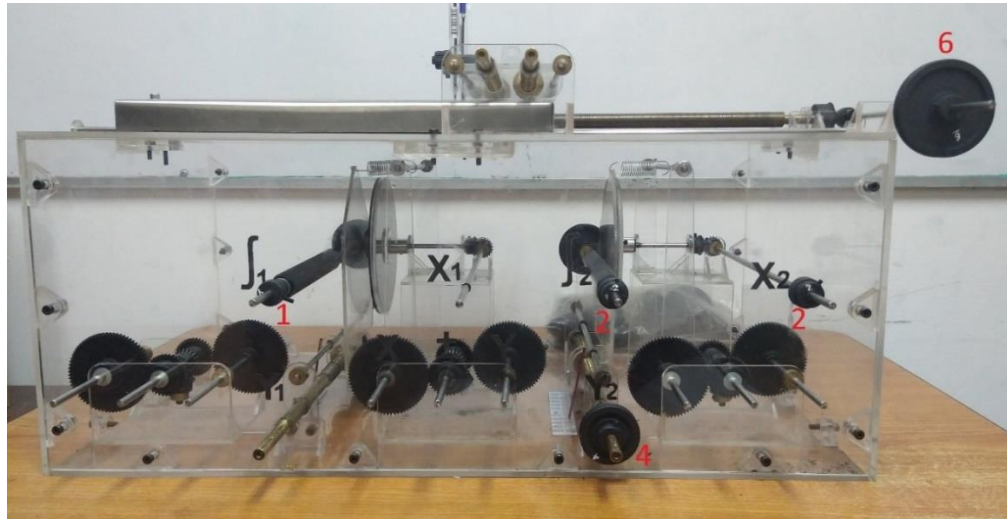


Fuente: [8]

El primer paso es montar las poleas correspondientes en sus respectivos ejes. Como hay ejes que portan más de una polea y las correas no deben tener contactos entre sí, esto se resuelve dividiendo la operación en tres planos de montaje diferentes.

En el primer plano se monta un juego de poleas compuesto por una polea número 1, dos poleas número 2, una polea número 4 y una polea número 6. La polea número 1 va montada sobre el eje del integrador número 1. Una de las poleas número 2 se ubica en el eje correspondiente al integrador 2 y la otra polea número 2 en el eje correspondiente a X2. La polea número 4 se acopla al eje correspondiente a Y2 y por último en este plano se ensambla la polea número 6 sobre el eje de entrada a la mesa del graficador. Este primer plano se observa a continuación en la figura número 74.

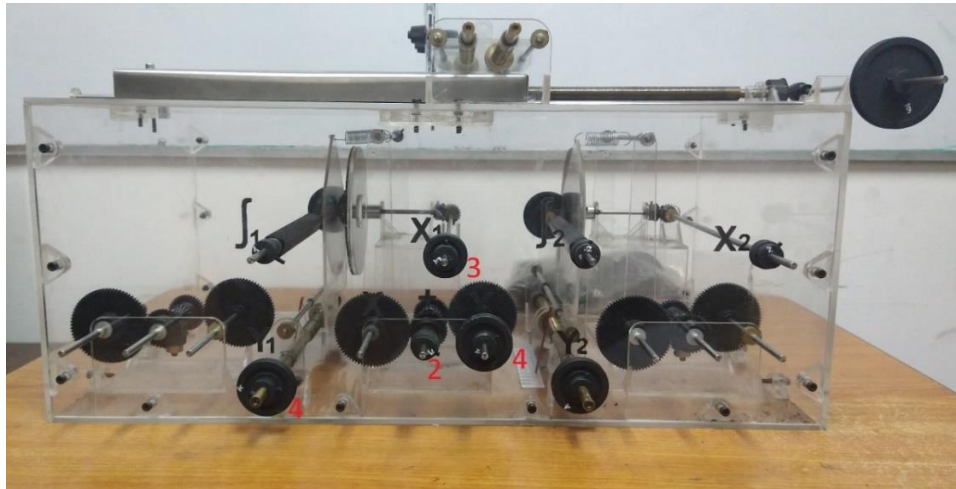
Figura 74. Plano de montaje 1



Fuente: Autores

En el segundo plano se monta un siguiente juego de poleas compuesto por una polea número 2, una polea número 3 y dos poleas número 4. La polea número 2 va sobre el eje de salida del mecanismo sumador. La polea número 3 se acopla al eje correspondiente a X1. Una de las poleas número 4 se acopla a la entrada Y del mecanismo sumador y la otra polea número 4 en el eje que corresponde a Y1. Este segundo plano se observa a continuación en la figura número 75.

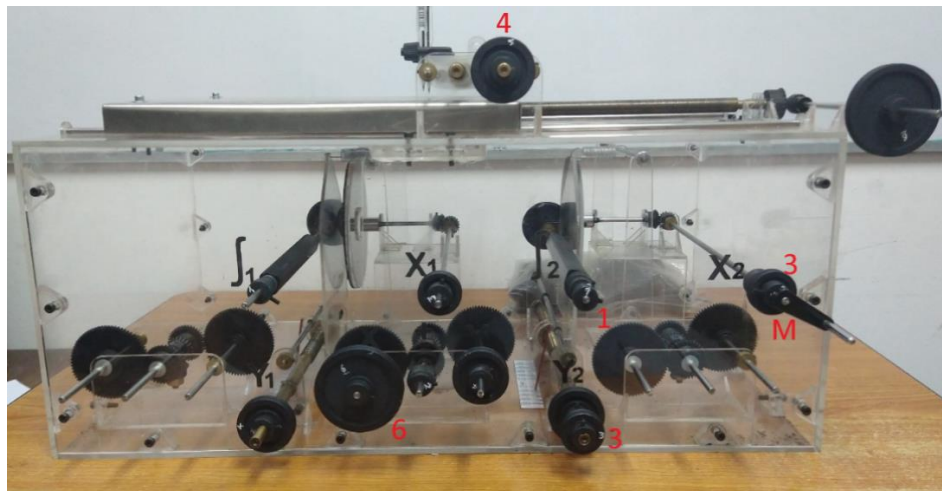
Figura 75. Plano de montaje 2



Fuente: Autores

En el tercer y último plano se monta el siguiente juego de poleas compuesto por una polea número 1, dos poleas número 3, una polea número 4, una polea número 6 y finalmente la manivela con la cual daremos inicio al movimiento sobre el eje del tiempo. La polea número 1 va montada sobre el eje del integrador número 2, una de las poleas número 3 es fijada sobre el eje de Y2 y la siguiente polea número 3 sobre el eje correspondiente a X2, posteriormente en este mismo eje anclaremos la manivela (M) y la polea número 4 se debe de ubicar en el eje derecho del carro graficador, finalmente se ensambla la polea número 6 en el eje X del mecanismo sumador. Este tercer plano se observa en la figura número 76.

Figura 76. Plano de montaje 3

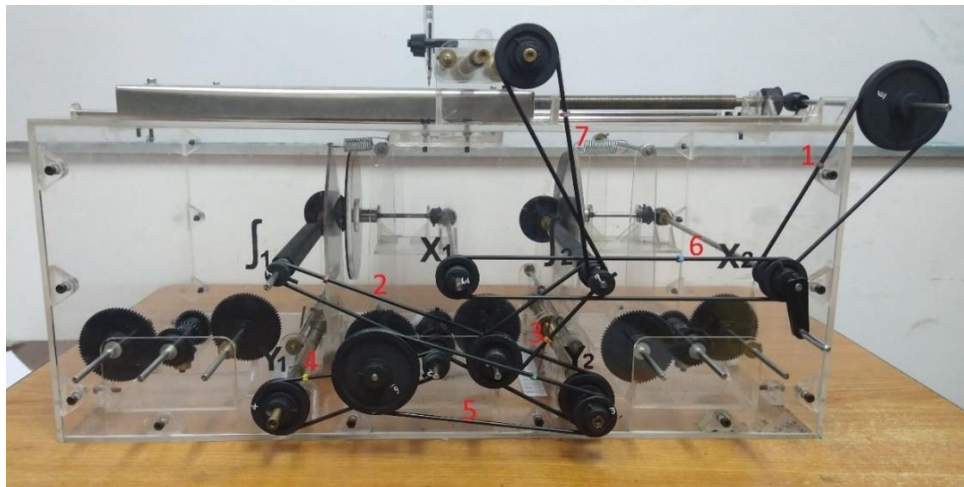


Fuente: Autores

El siguiente paso es realizar las conexiones entre poleas a través de las correas las cuales se encuentran numeradas y separadas para esta práctica en una bolsa de cierre hermético, cabe aclarar que la numeración de las correas corresponde al orden en que se deben de montar de derecha a izquierda, adicionalmente para la finalización de la práctica se deben colocar las marcas y /o numeración a cada correa, retirar y guardar en su respectiva bolsa para evitar confusiones.

La correa número 1 va a realizar la conexión entre la polea número 2 de X2 y la polea número 6 del eje de entrada de la mesa del graficador montadas previamente en el primer plano. La correa número 2 efectuará la conexión entre la polea número 1 del integrador 1 y la polea número 4 de Y2 también correspondiente al primer plano de poleas. La correa número 3 ejecutará la conexión entre la polea número 2 del integrador 2 y la polea número 4 del eje de entrada Y del sumador, la correa número 4 elaborará la conexión de las poleas número 2 de la salida del sumador y la polea número 4 de Y1 acopladas en el segundo plano de poleas. En esta conexión se debe garantizar que la correa pase por debajo del eje X del sumador seguidamente la correa número 5 realiza la conexión entre la polea número 3 de Y2 y la polea número 6 de X del sumador correspondientes al tercer plano de poleas. La correa número 6 efectúa la conexión entre la polea número 3 de X1 y la polea número 3 de X2. Por último, la correa número 7 ejecutará la conexión entre la polea número 1 del integrador número 2 y la polea número 4 del carro graficador, en esta conexión es muy importante que la correa se encuentre cruzada con el fin de obtener el sentido de giro apropiado para la ejecución de esta práctica. Este paso puede ser observado en la siguiente figura número 77.

Figura 77. Montaje de correas y poleas

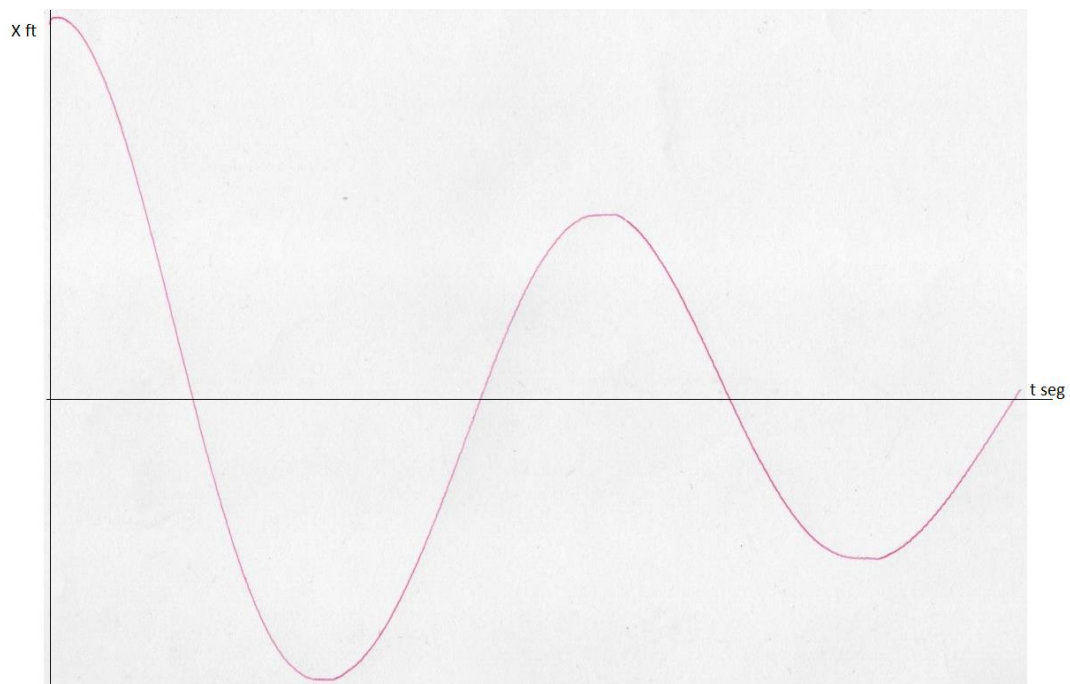


Fuente: Autores

En este punto de la práctica, ya se tiene realizados todos los acoples de las poleas con sus respectivas conexiones y también el acople de la manivela. El siguiente paso es llevar el computador analógico a sus condiciones iniciales para empezar la operación del mismo. Se empieza por fijar la hoja en la mesa del graficador. El carro porta pluma debe de estar ubicado en el extremo izquierdo posterior de la mesa del graficador y la pluma asentada suavemente sobre la hoja. El integrador número 1 se debe ubicar en -50 mientras que el integrador número 2 se ubica en 0. En este momento ya se han garantizado todas las condiciones iniciales para efectuar la operación del computador. Para ello se gira la manivela a un ritmo constante en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

Al finalizar la practica el resultado obtenido es una gráfica como la que se observa en la figura número 78 la cual corresponde a un movimiento oscilatorio que va decreciendo.

Figura 78. Grafica obtenida vibración con amortiguación viscosa



Fuente: Autores

7. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 RESULTADOS

Se obtuvo un equipo didáctico funcional capaz de procesar funciones de primer y segundo orden con una disminución significativa en el error apreciable respecto al dispositivo inicial donde los resultados son graficas que corresponden a lo esperado acorde a la teoría gracias a la tecnología implementada.

Desde el punto de vista de la fabricación de las piezas que componen el equipo, es notable la diferencia en cuanto a aspectos técnicos y estéticos como lo son la precisión y el hecho de que es observable el proceso de cálculo de los mecanismos a través del acrílico cristal.

Como complemento a la restauración, se realiza un manual de operación y prácticas donde se ejecuta un montaje paso a paso de acuerdo con la programación propia de cada uno de los ejercicios propuestos. Cabe resaltar que en comparación con lo plasmado en el instructivo original [8], el propuesto en este proyecto, es más claro, completo y de fácil ejecución.

7.2 CONCLUSIONES

- Se realizó una la revisión bibliográfica sobre mecanos y computadores analógicos mecánicos.
- Se desarrolló un inventario de piezas faltantes, rotas, defectuosas y se diagnosticó el estado inicial del computador analógico.
- Se fabricó e instaló las piezas faltantes, rotas y/o defectuosas.
- Se ejecutaron pruebas de funcionamiento a partir del documento original del mecano.
- Se elaboró el manual de prácticas del computador analógico mecánico.
- Se hizo la reconstrucción del computador analógico mecánico del Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control de la Universidad Tecnológica de Pereira.

7.3 RECOMENDACIONES

Si bien se satisficieron las expectativas con los resultados obtenidos, quedan aún mejoras que se pueden realizar en el computador analógico mecánico tales como la implementación adecuada de rodamientos en los ejes de cada uno de los sistemas, cambiar las transmisiones de poleas y correas por cadenas y piñones o *sprockets*.

Al momento de abordar este proyecto, se evidenció una discrepancia entre el equipo y lo descrito en el documento, esto se refiere a que físicamente se encontró dos mecanismos sumadores adicionales y en la documentación solo estaba involucrado un solo sistema. Se cree que en algún momento posterior a la fabricación hubo un intento de ampliación por lo tanto se deja a la expectativa el continuar con ello.

Para la correcta operación del computador analógico mecánico, se recomienda el realizar una modesta rutina de lubricación que comprende la aplicación de grafito en los tornillos tanto de los integradores como en los del graficador y en los sistemas que comprenden transmisión por engranajes, aceite en los apoyos de los ejes y fluido antideslizante en las correas, poleas y discos de fricción.

8. BIBLIOGRAFÍA

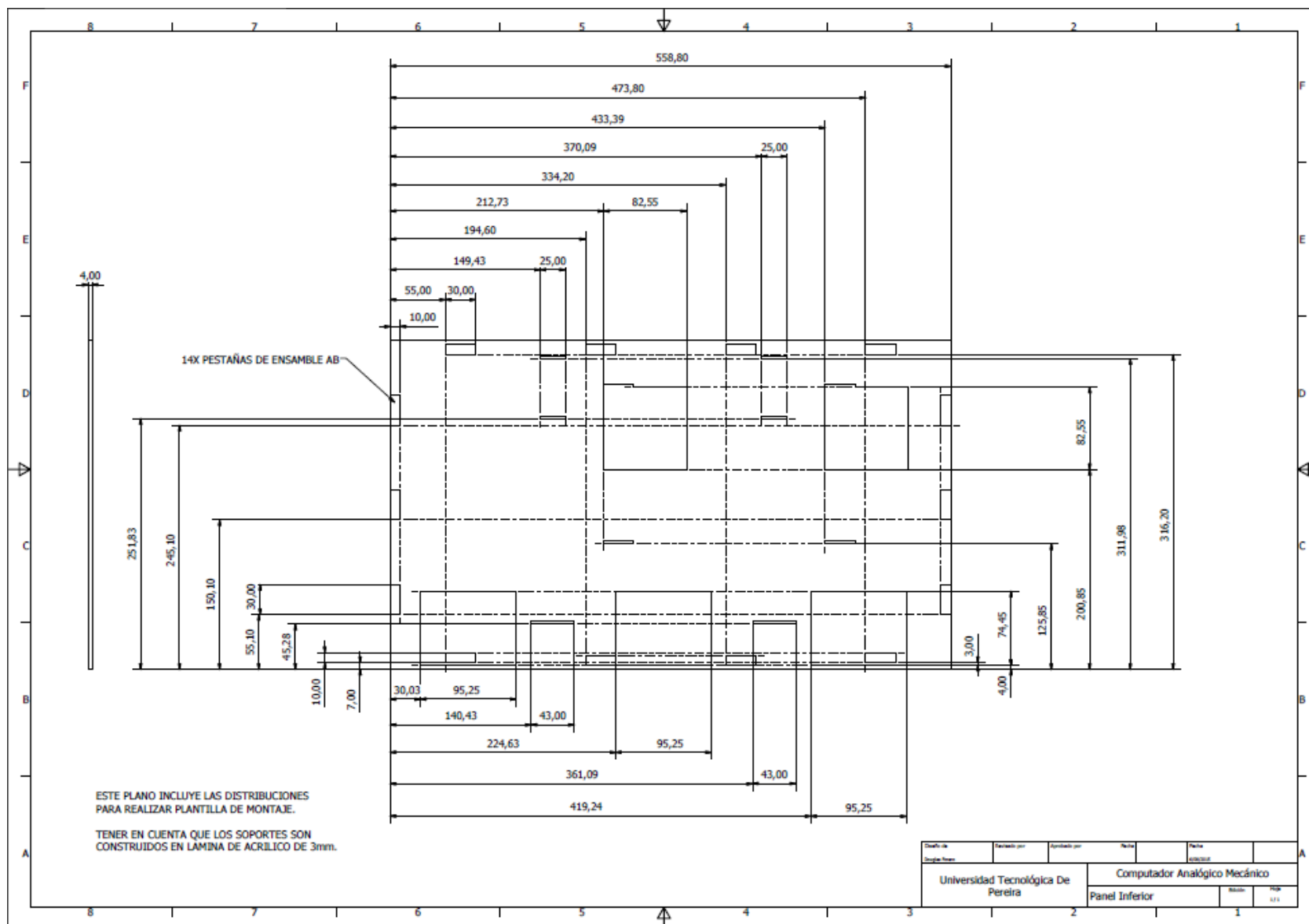
1. **Sánchez, Ma Asun García.** Centro Virtual de Divulgación de las Matemáticas. [En línea] 2010/2011. http://divulgamat2.ehu.es/divulgamat15/index.php?option=com_content&view=article&id=10884%3Aun-paseo-por-la-geometria&catid=136%3Acursos-y-ciclos-de-conferencias&Itemid=44&limitstart=2.
2. **Beckham, Mike.** *La Primera Computadora Del Mundo- Decodificando El Mecanismo De Anticitera*. [prod.] Mike Beckham y Roger Hadland. Images First, 2012. Presentada por HISTORY CHANNEL.
3. *Juegos de ordenador. Hallazgo de un paleo-ordenador, hecho de cuerdas y poleas, en la isla de Apraful.* **Dewdney, A. K.** [ed.] Francisco García Guillén. 141, Barcelona (España): Prensa Científica S. A. Calabria, 1988, Investigación y Ciencia, págs. 94,95,96,97,98. ISSN 0210-136X.
4. **Museo Virtual.** Universidad Politécnica de Madrid. *Escuela Universitaria de Informática*. [En línea] http://www.eui.upm.es/museo_virtual/origenes/jmjacquard.
5. **Paynter, Henry M.** *The Differential Analyzer as an Active Mathematical Instrument*. Diciembre de 1989. Keynote Speech to the 1989 American Control Conference, Vol. 9. <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.utp.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=41449>. 0272-1708.
6. **Bromley, Allan G.** *British Mechanical Gunnery Computers of World War II*. [University of Sidney - Basser Department of Computer Science] [trad.] Douglas A. Forero. 18 de enero de 1984. <http://sydney.edu.au/engineering/it/~tr/>. 0-909798-63x.
7. **Moreno, Manuel Alfonseca.** *La máquina de Turing*. [aut. libro] Sociedad Canaria Isaac Newton de Profesores de Matemáticas. Universidad de La Laguna. [ed.] Jose Luis Aguiar. *Las matemáticas del siglo XX una mirada en 101 artículos*. La Laguna (Tenerife). España: NIVOLA libros y ediciones, S. L., 2000.
8. **Gutiérrez, Fernando Hoyos y Orrego, León Duque.** *Un Computador Analógico Mecánico*. Pereira: s.n., Julio de 1.976.
9. **Ray Spiess.** COMDYNA. *ANALOG COMPUTERS*. [En línea] <http://www.comdyna.com/>.

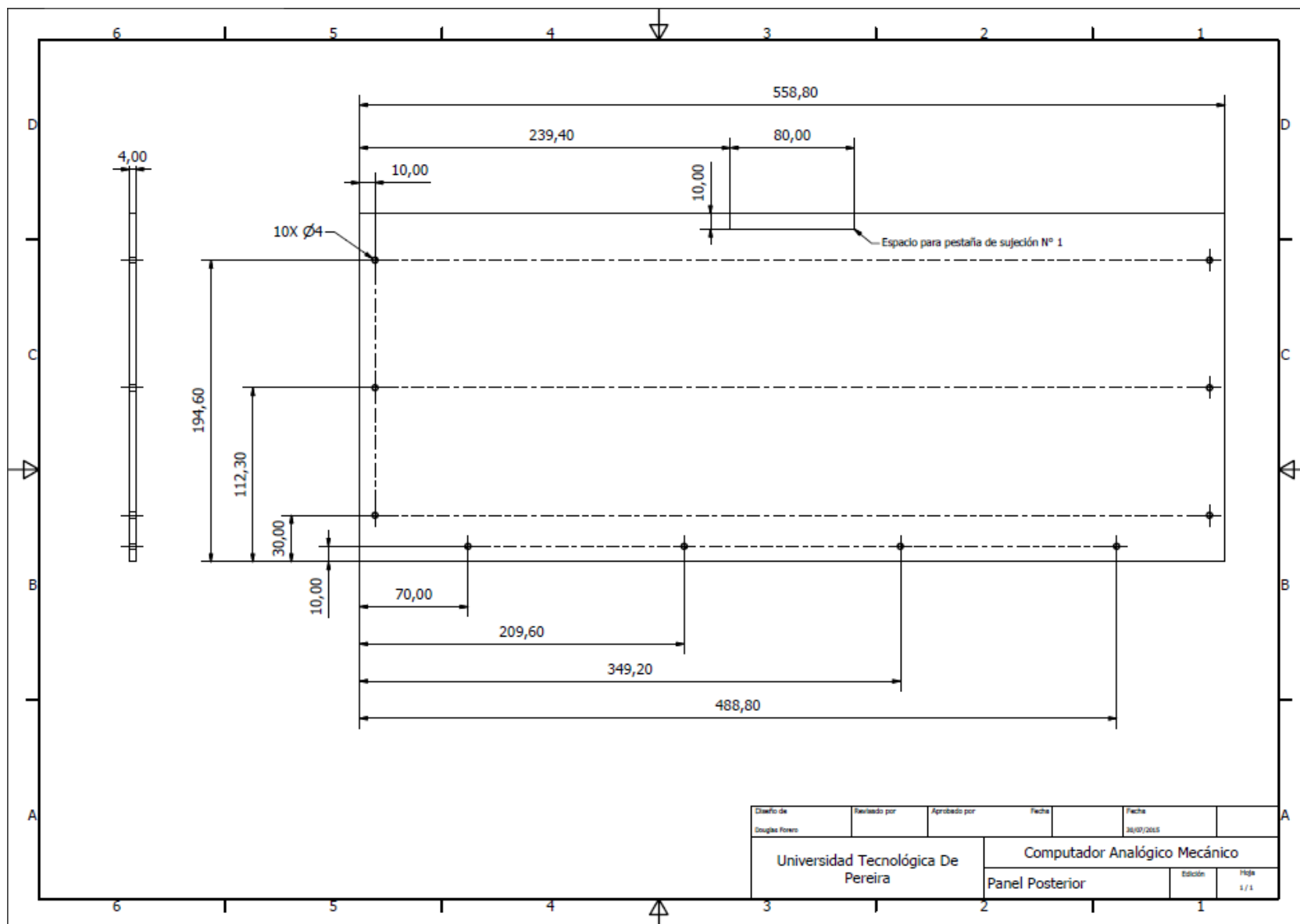
10. **Web De La Academia.** Web De La Academia. [En línea]
http://centrodeartigos.com/articulos-noticias-consejos/article_140084.html.
11. **Harvard University.** HARVARD ROBOTICS LABORATORY. [En línea]
<http://hrl.harvard.edu/research/index.html#analog>.
12. **Indiana University.** SCHOOL OF INFORMATICS AND COMPUTING. [En línea]
<http://www.soic.indiana.edu/people/profiles/mills-jonathan.shtml>.
13. **INTERNATIONAL, AUTOMAT SERVICE.** *The AUTOMAT - Engineering Set For Thehcnical Education*. Schriesheim: s.n.
14. **Marín, Fernando Arboleda y Trujillo, Luis Fernando Castrillón.** *Diseño y Construcción De Un Mecano Para El Análisis De Mecanismos De Cuatro Barras y Combinaciones*. Pereira: s.n., junio de 1.975.
15. **Franco, Alejandro Mariño y Pulgarín, Miguel Angel Díaz.** *Reconstrucción, Caracterización y Modernización De Un Mecano Para Fines Didácticos*. Pereira: s.n., 2.008.
16. **EcuRed.** EcuRed. [En línea]
http://www.ecured.cu/index.php/Computadora_anal%C3%B3gica.
17. *Continuous-System Simulation, Control Engineering and the Analog Computer, Control Engineering and the Analog Computer.* **Robinson, Tim, Korn, Granino A. y Atherton, Derek P.** [ed.] Dennis S. Bernstein. 3, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., June de 2005, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 25.
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.utp.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1432602>. ISSN 0272-1708.
18. *Juegos de ordenador. Un ordenador mecano que juega al tres en raya.* **Dewdney, A. K.** [ed.] Francisco García Guillén. 159, Barcelona (España) : Prensa Científica S. A. Calabria, 1989, Investigación y Ciencia, págs. 97,98,99,100. ISSN 0210-136X.
19. **Ray Spiess.** COMDYNA. ANALOG COMPUTERS. [En línea]
<http://www.comdyna.com/>.
20. **López, Ph.D. Alberto.** Universidad Antonio de Nebrija. *Departamento de Ingeniería Mecánica*. [En línea] http://www.nebrija.es/~alopezro/Engranajes_1.pdf.
21. **Galbarro, Hermenegildo Rodríguez.** ingemecanica.com. [En línea]
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html#seccion1>.
22. **Ph.D. Borobia, Jesús Mª Pintor.** IMAC: Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional. [En línea]
http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/tm/pdfdoc_th/apuntes/apuntes_tema7.pdf.

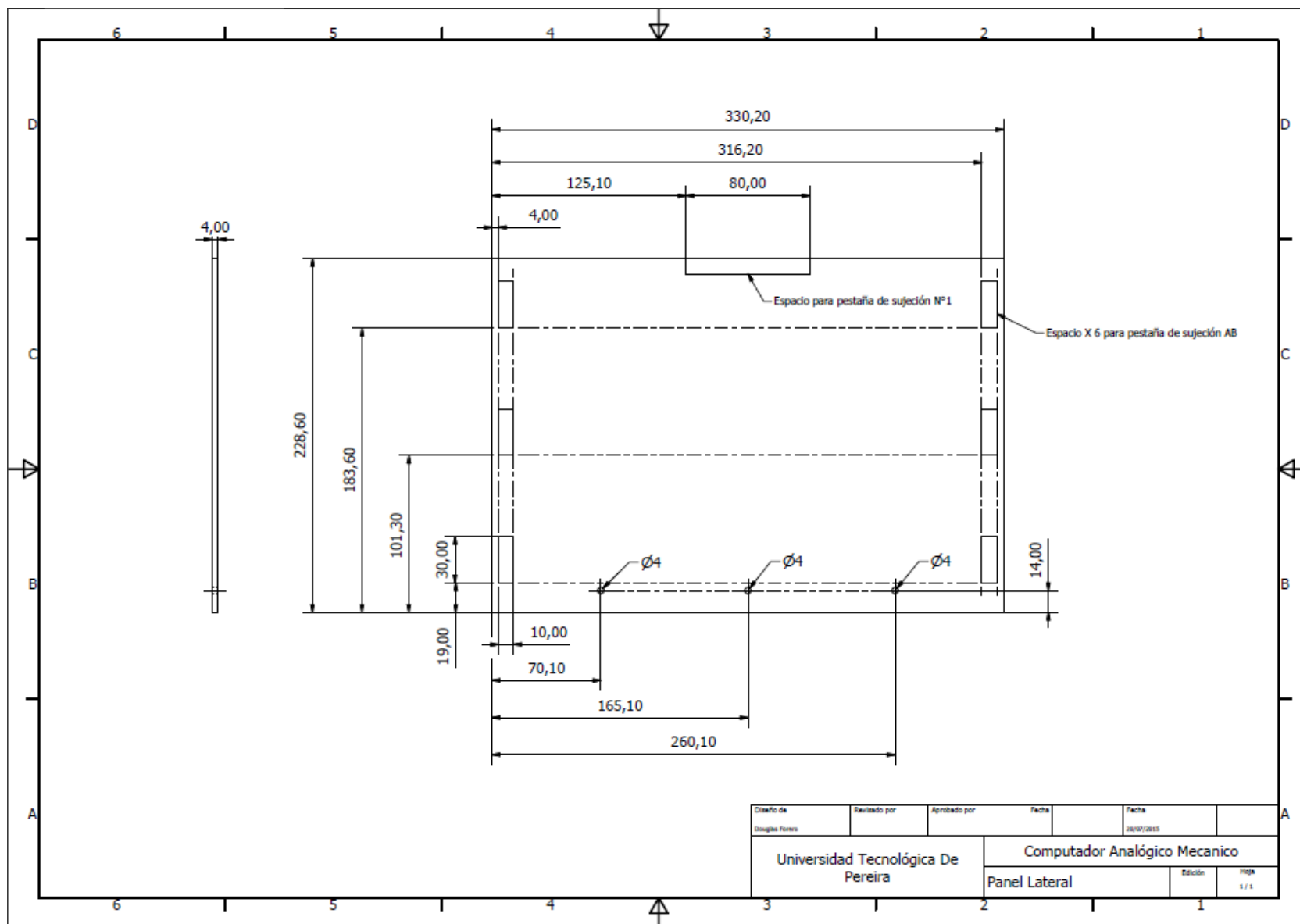
23. **Deutschman, Aaron D., Michels, Walter J. y Wilson, Charles E.** *Diseño de máquinas - Teoría y Práctica*. s.l.: Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. Mexico, 1987. ISBN 968-26-0600-4.
24. **Faires, Virgil Moring.** *Diseño De Elementos De Máquinas*. Barcelona: Montaner Y Simon S.A., 1980. ISBN 9788427404823.
25. **Hall, Allen S., Holowenco, Alfred R. y Laughlin, Herman G.** *Diseño de Maquinas - Serie Schaum*. s.l.: Mc. Graw Hill, 1971. ISBN 9684510772.
26. **Hamrock, Bernard J., Jacobson, Bo O. y Schmid, Stevev R.** *Elementos De Máquinas*. Mexico: Mc. Graw Hill, 2000. ISBN 970-10-2799-x.
27. **Kuo, C. Benjamín.** *Sistemas De Control Automático*. Séptima Edición. México: Prencice Hall, 1996. ISBN 0-13-304759-8.
28. **Nise, Norman S.** *Sistemas de control para ingeniería*. Tercera edición. México: Cecsca, 2004. ISBN 970-24-0254-9.
29. **Norton, Robert L.** *Diseño de máquinas*. Mexico: Pearson, 1999. ISNB 978-970-17-0257-4.

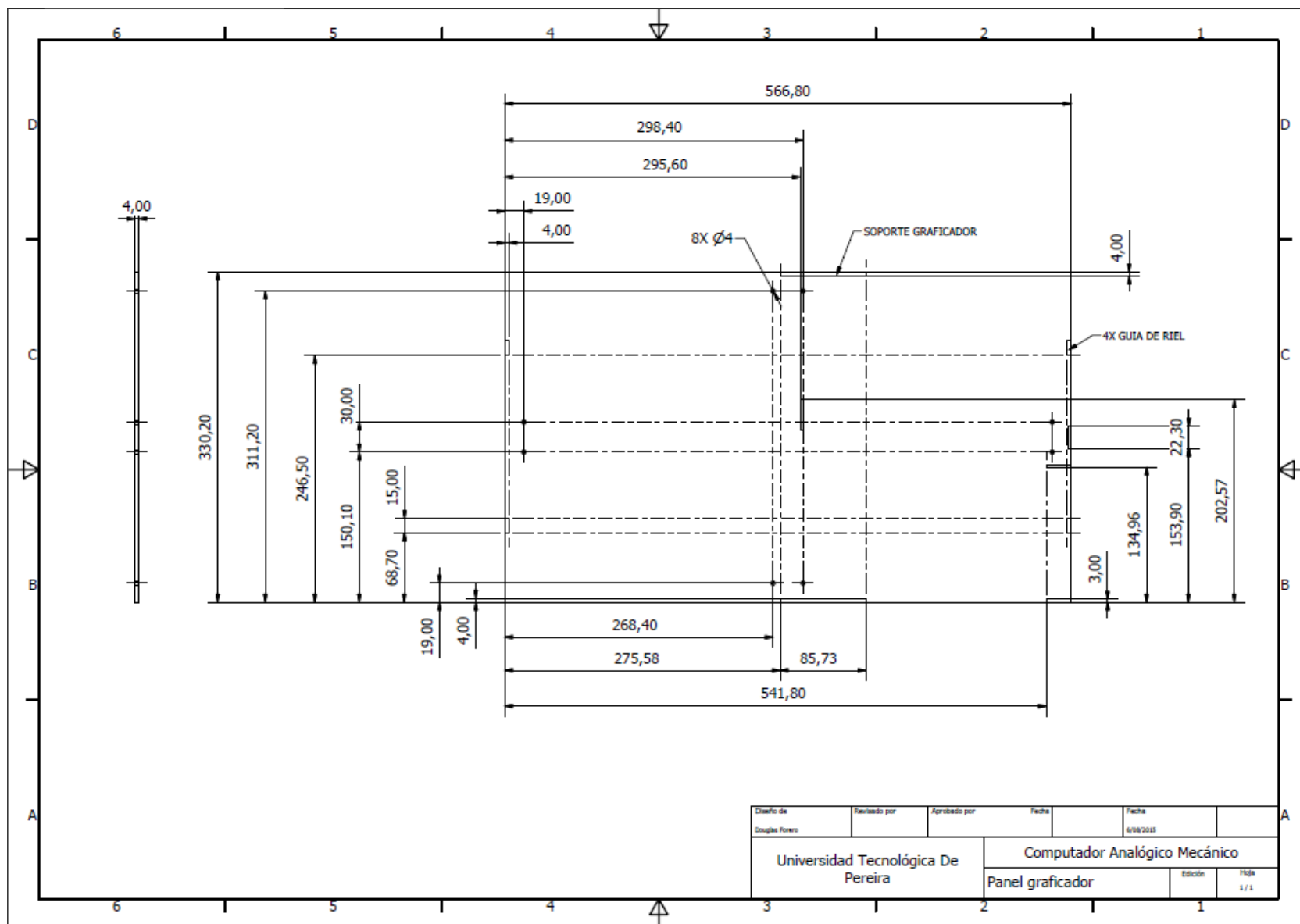
9. ANEXOS

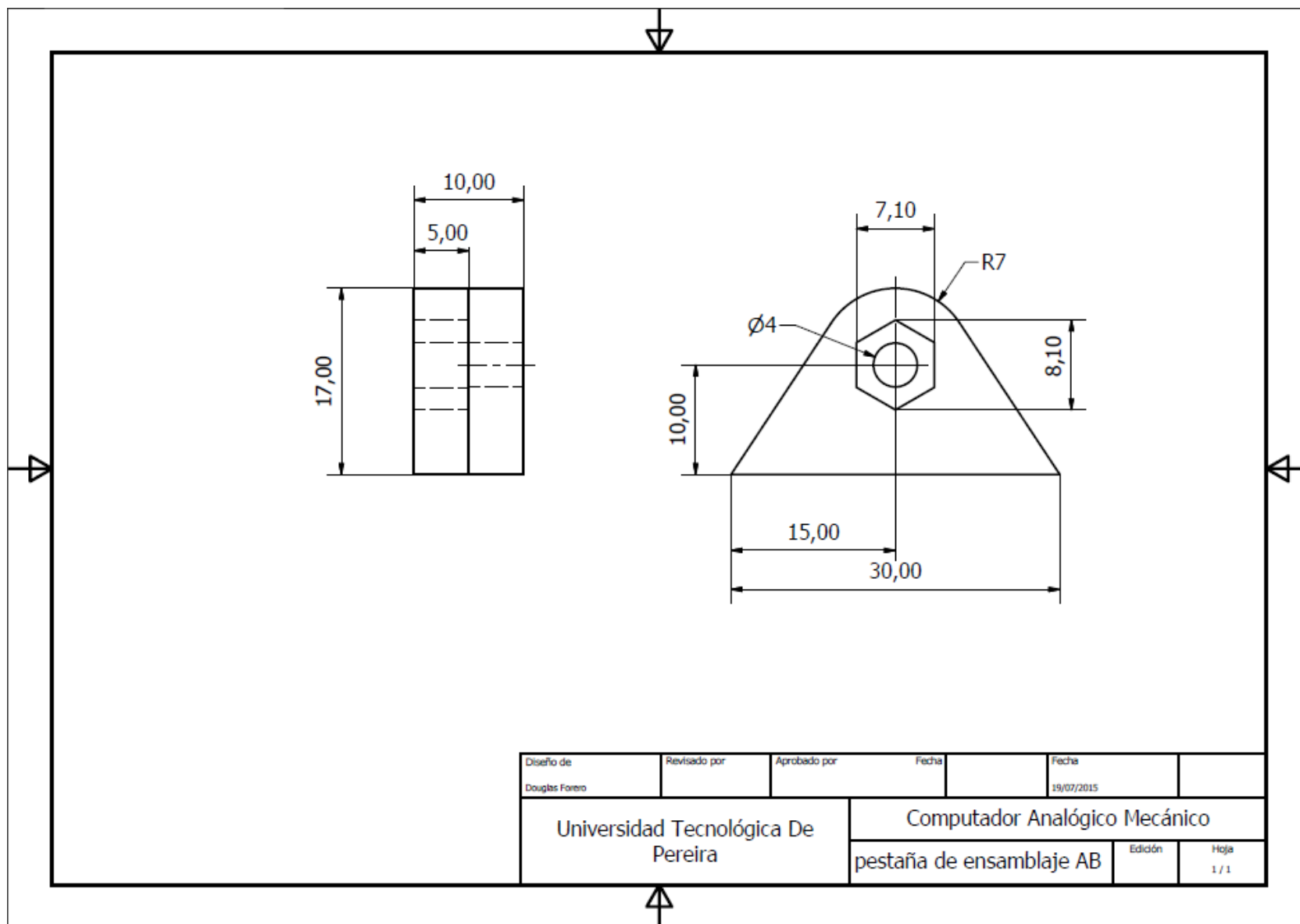
ANEXO A. PLANOS DE ENSAMBLES EN PLACAS DE ACRILICO

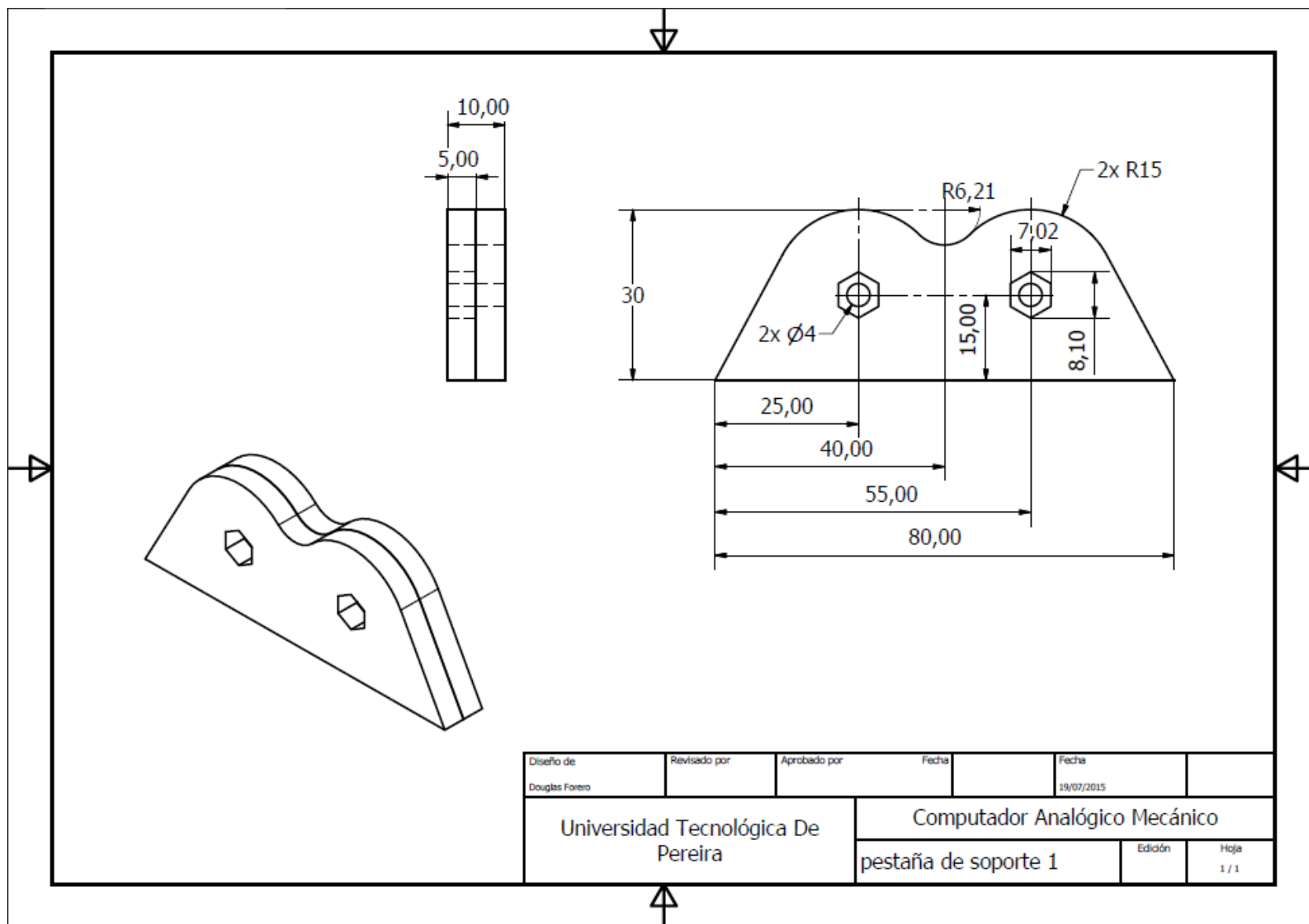


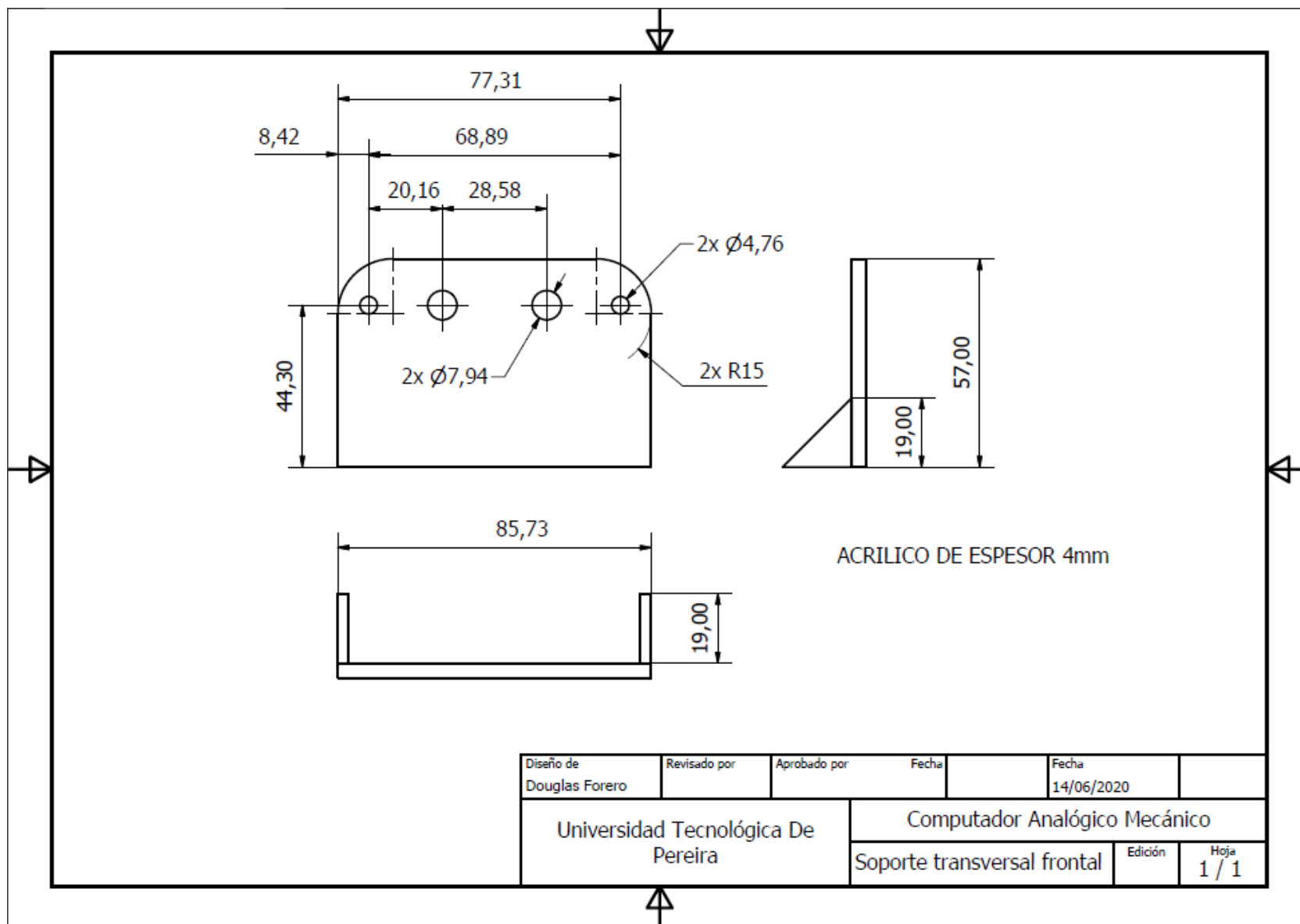


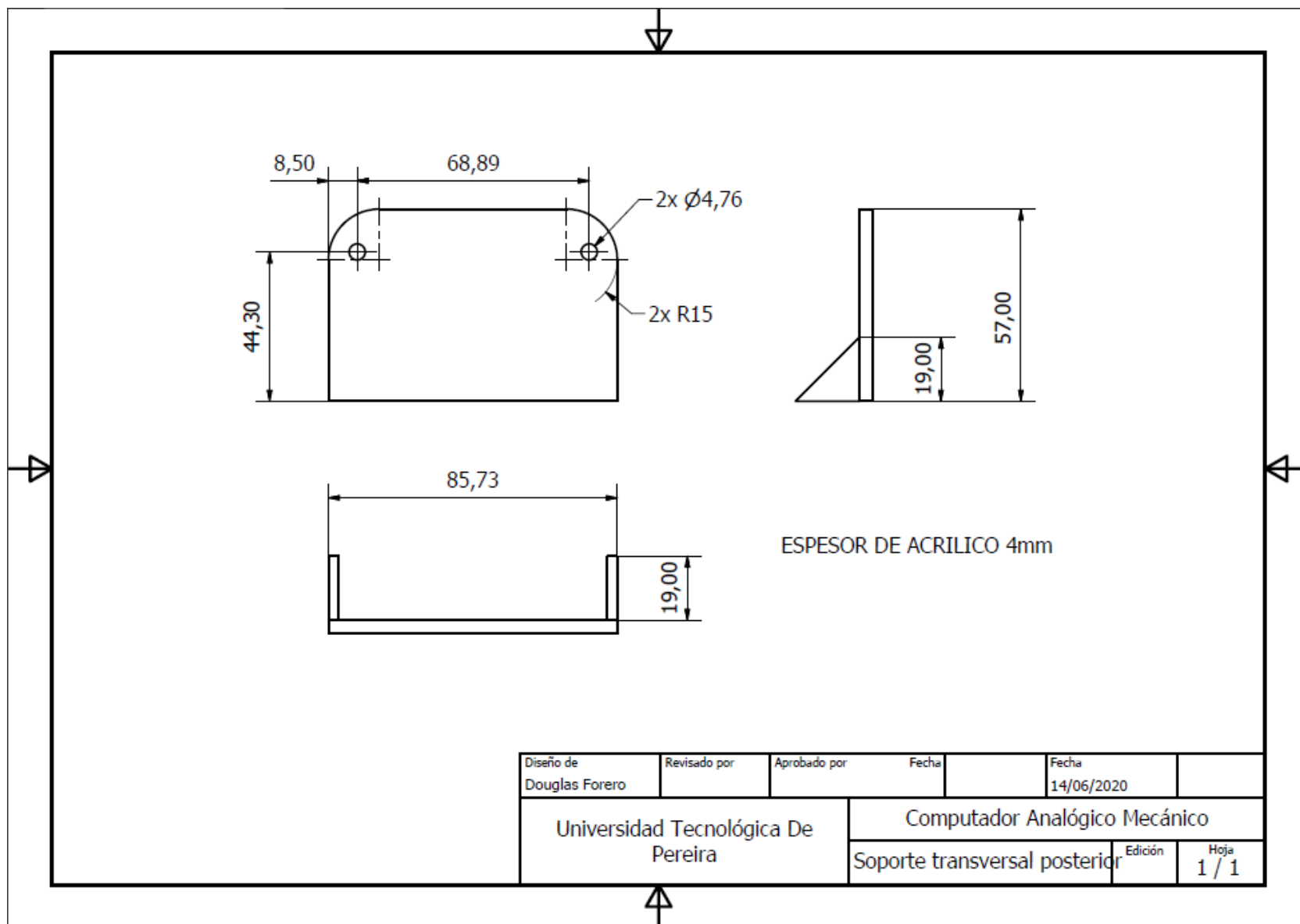


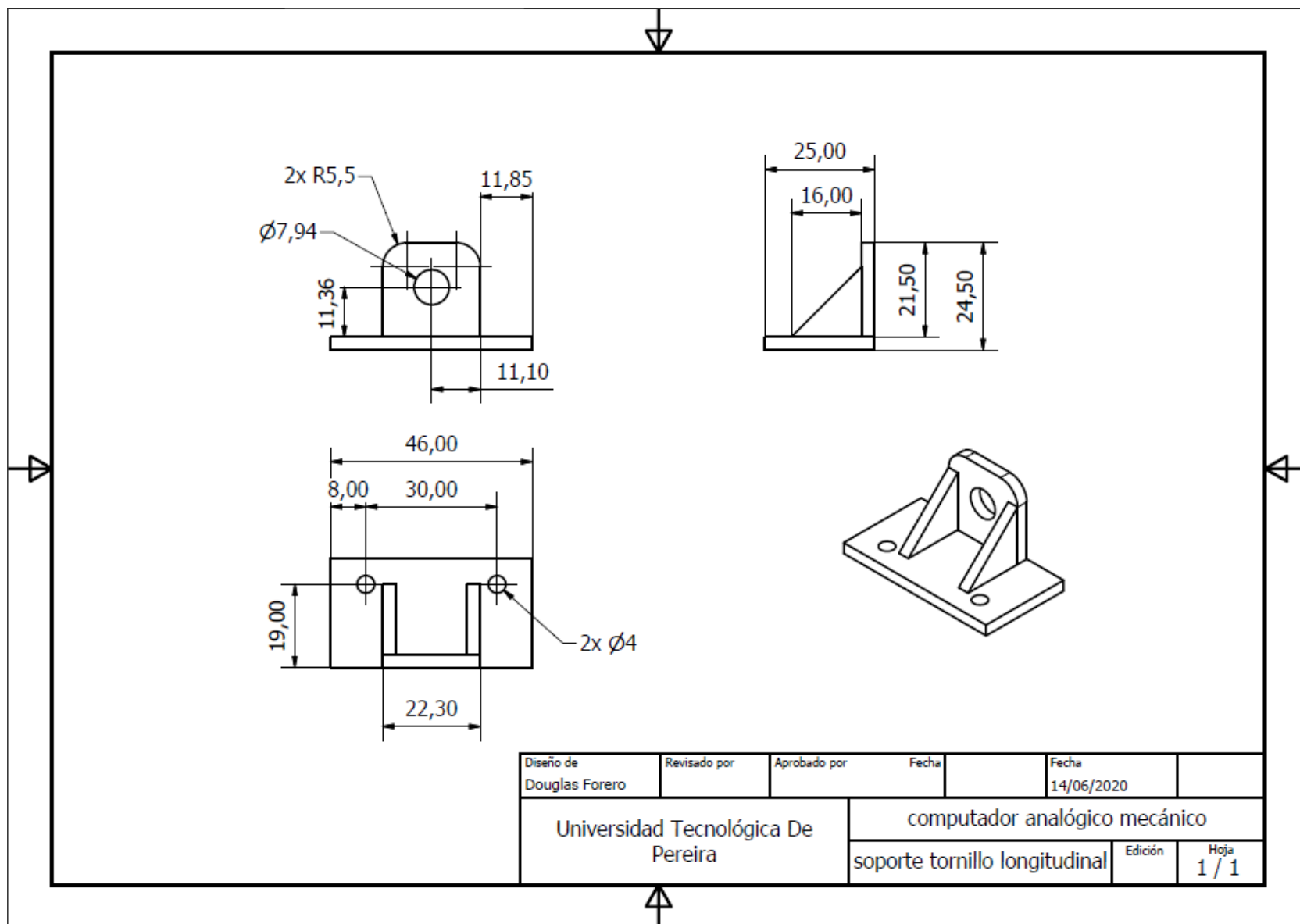


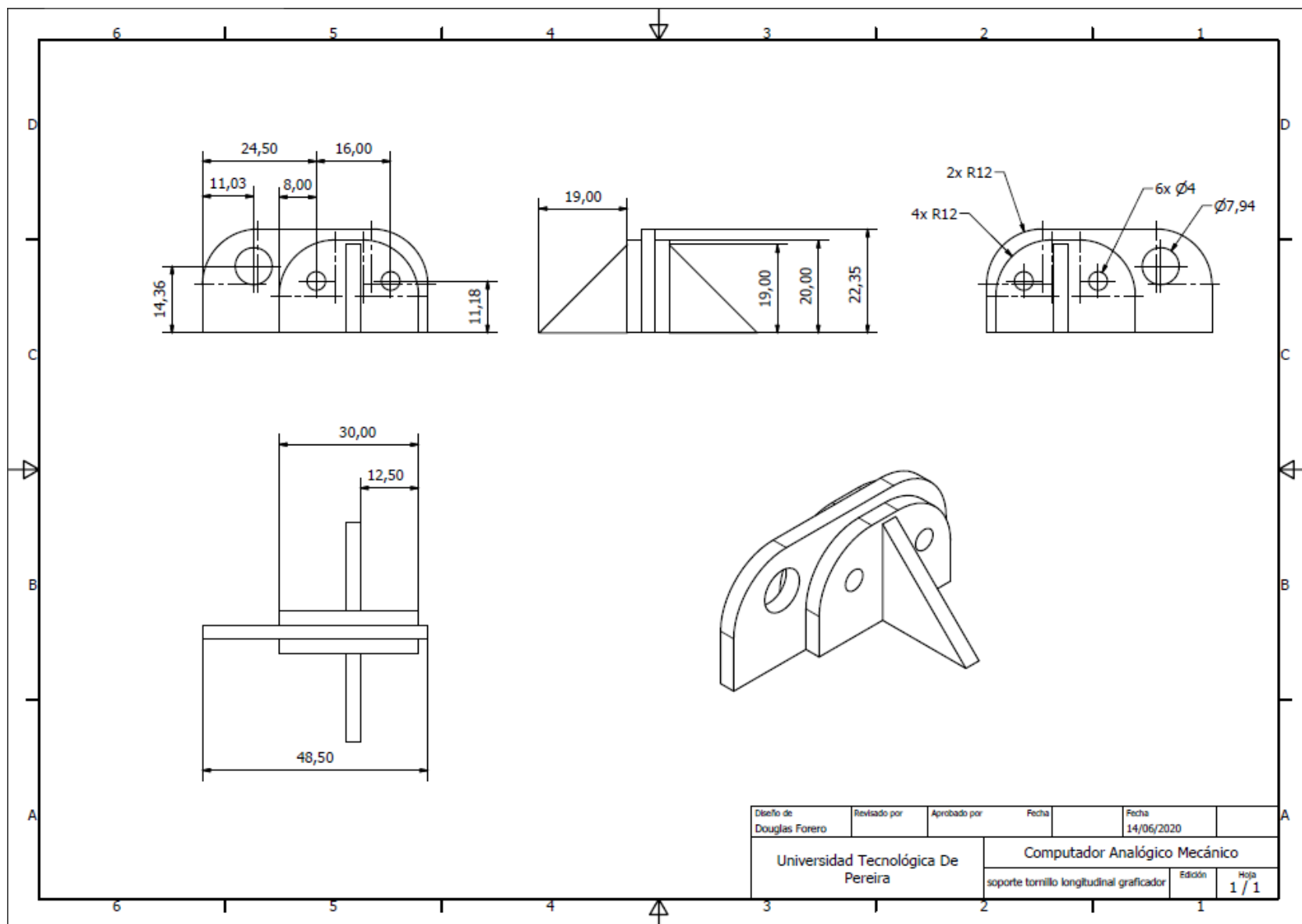


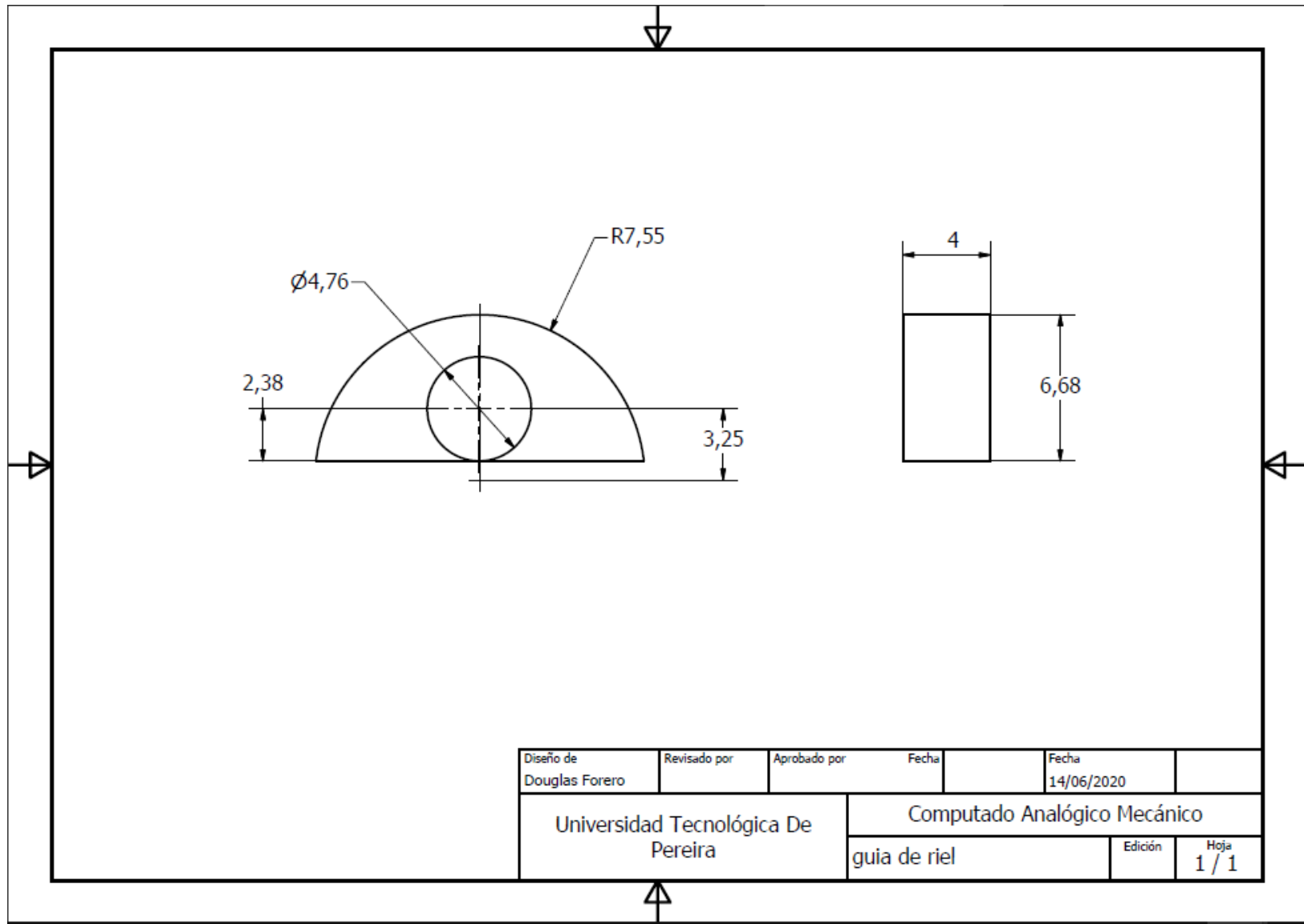


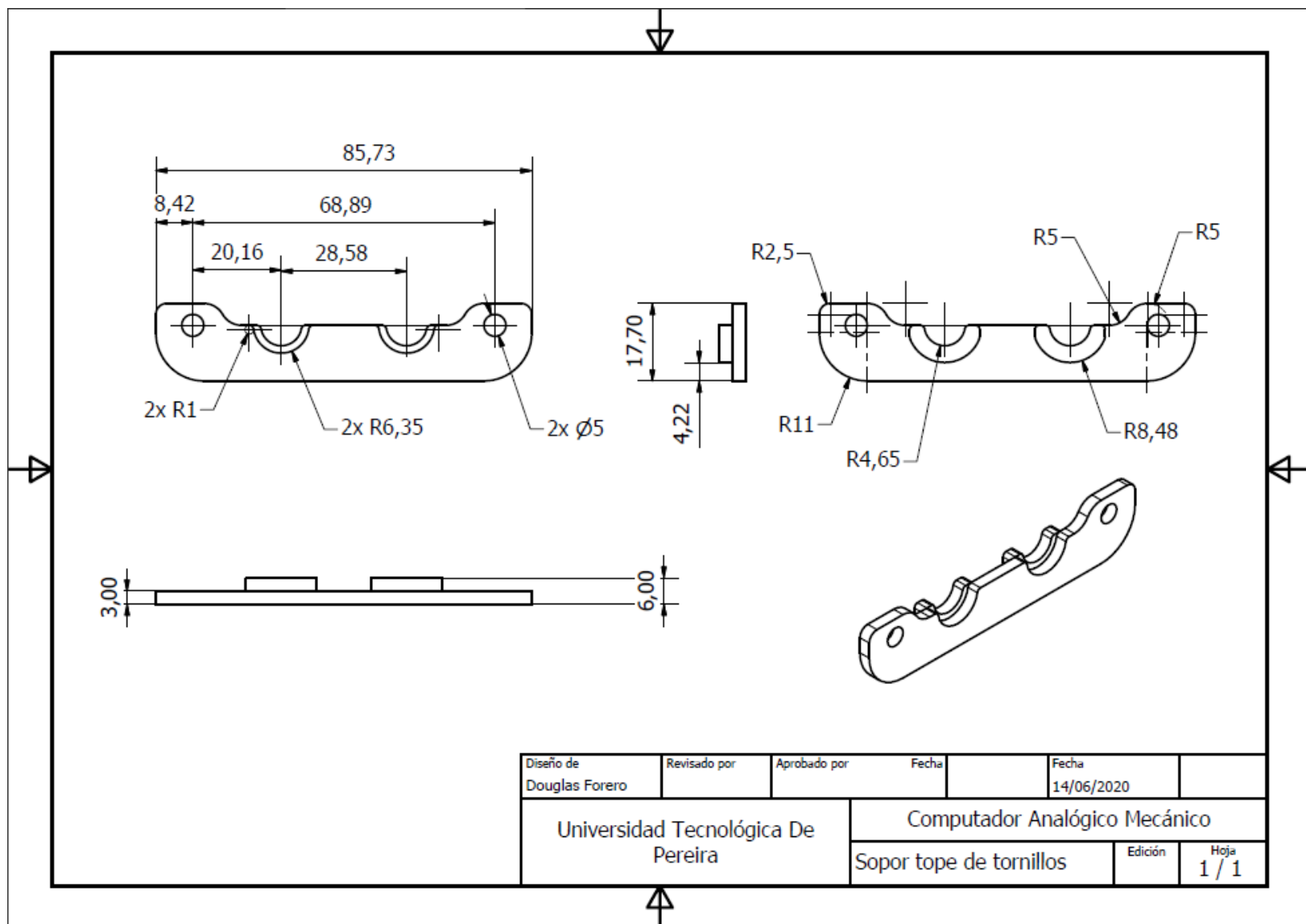


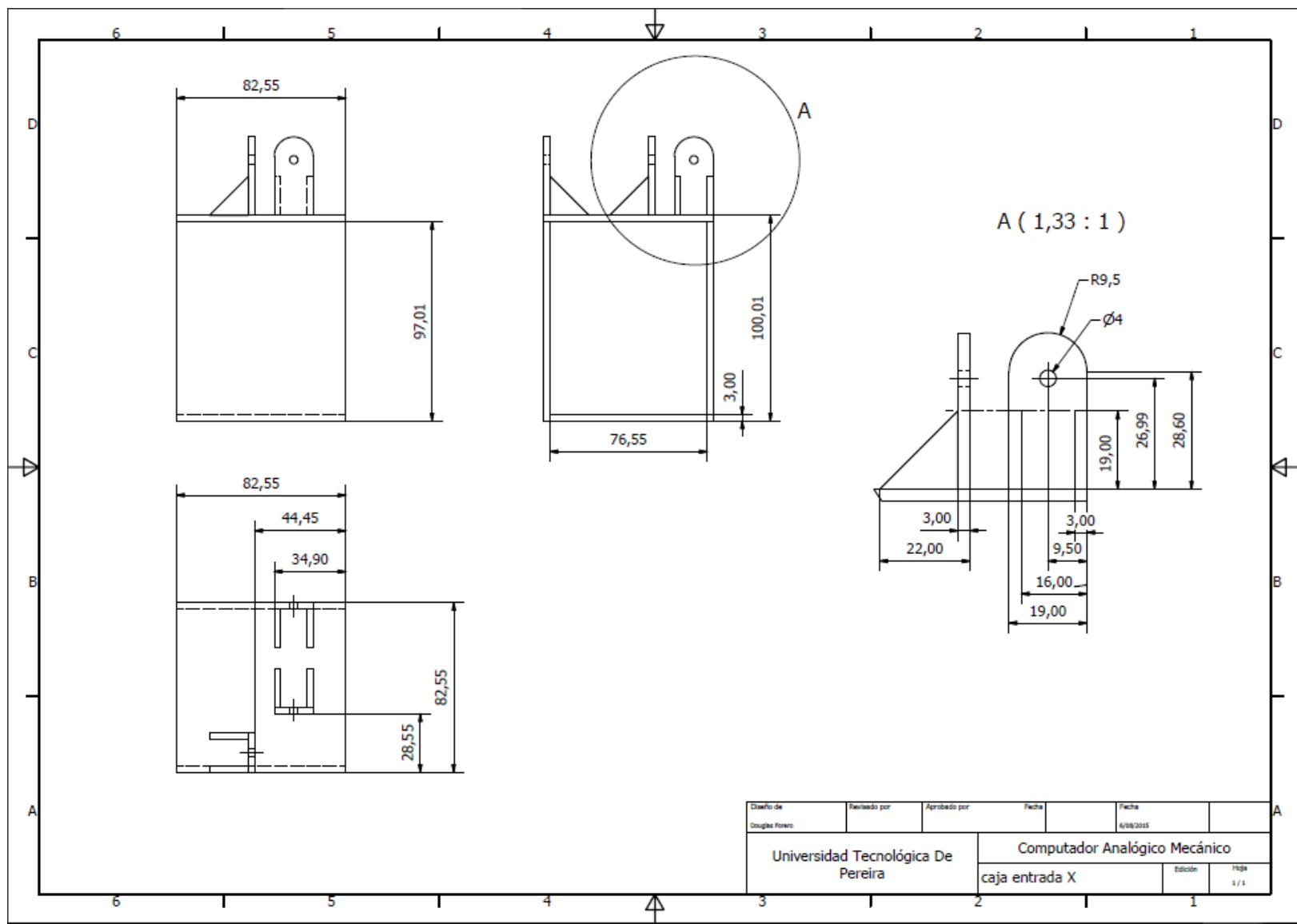


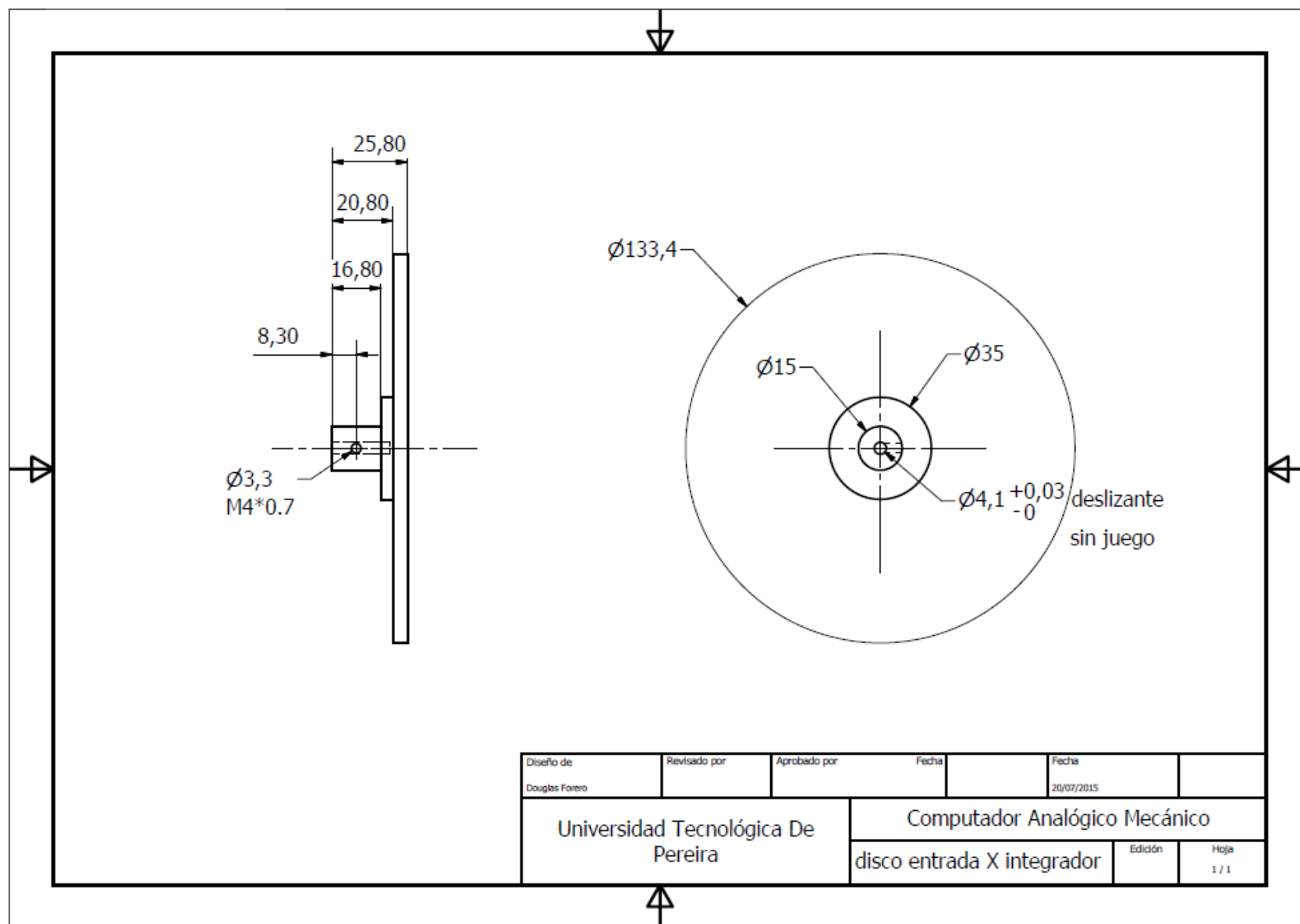


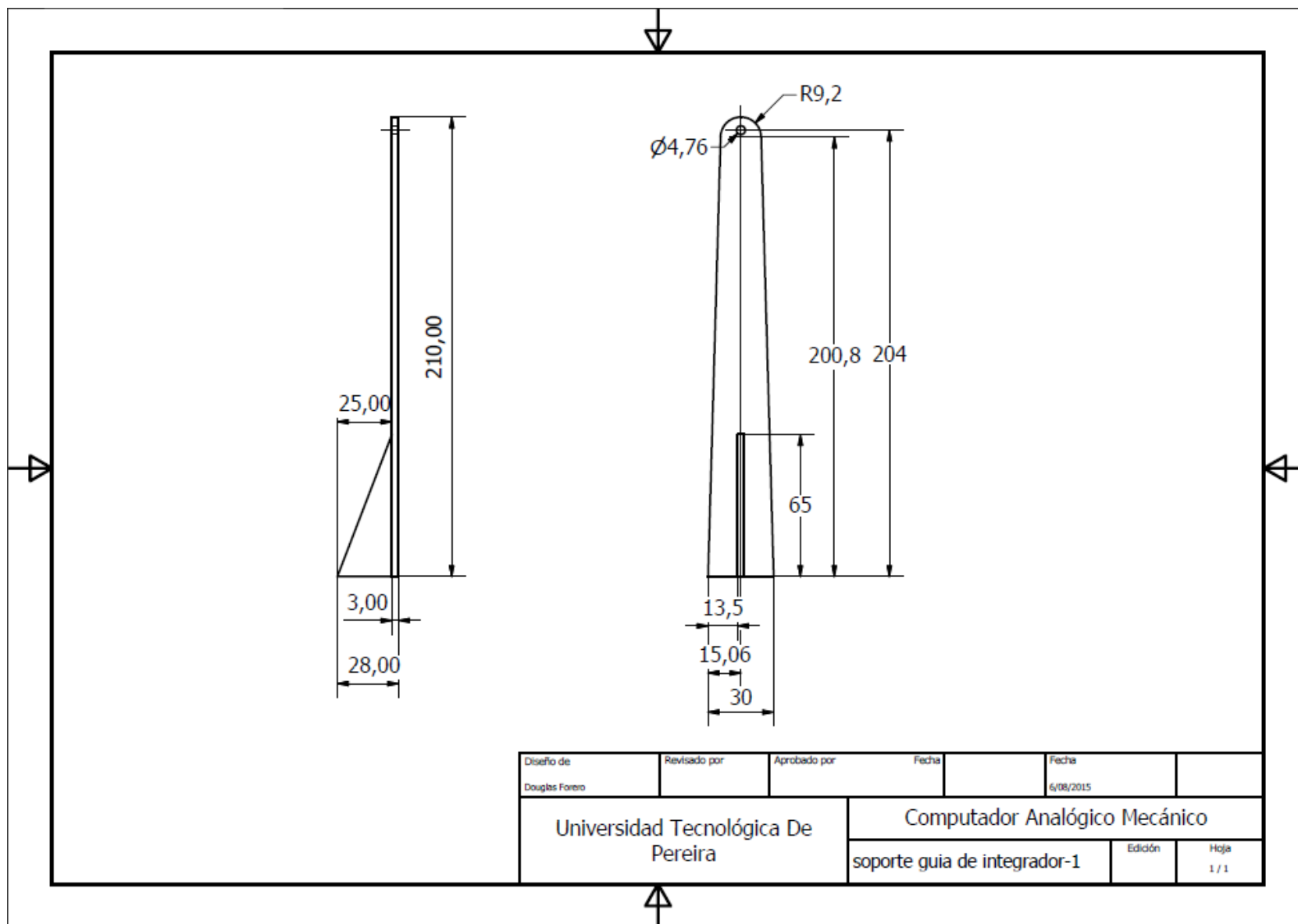


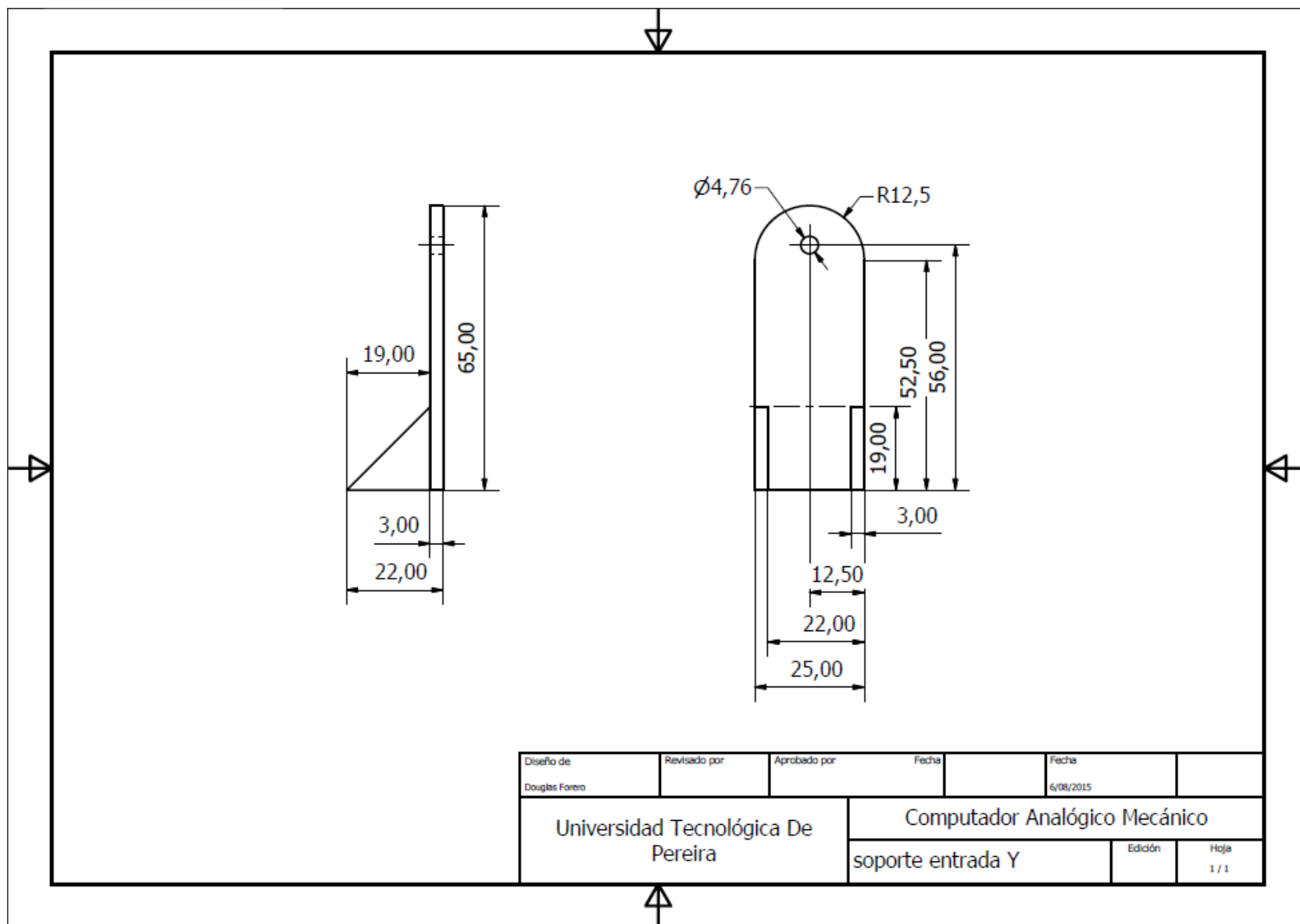


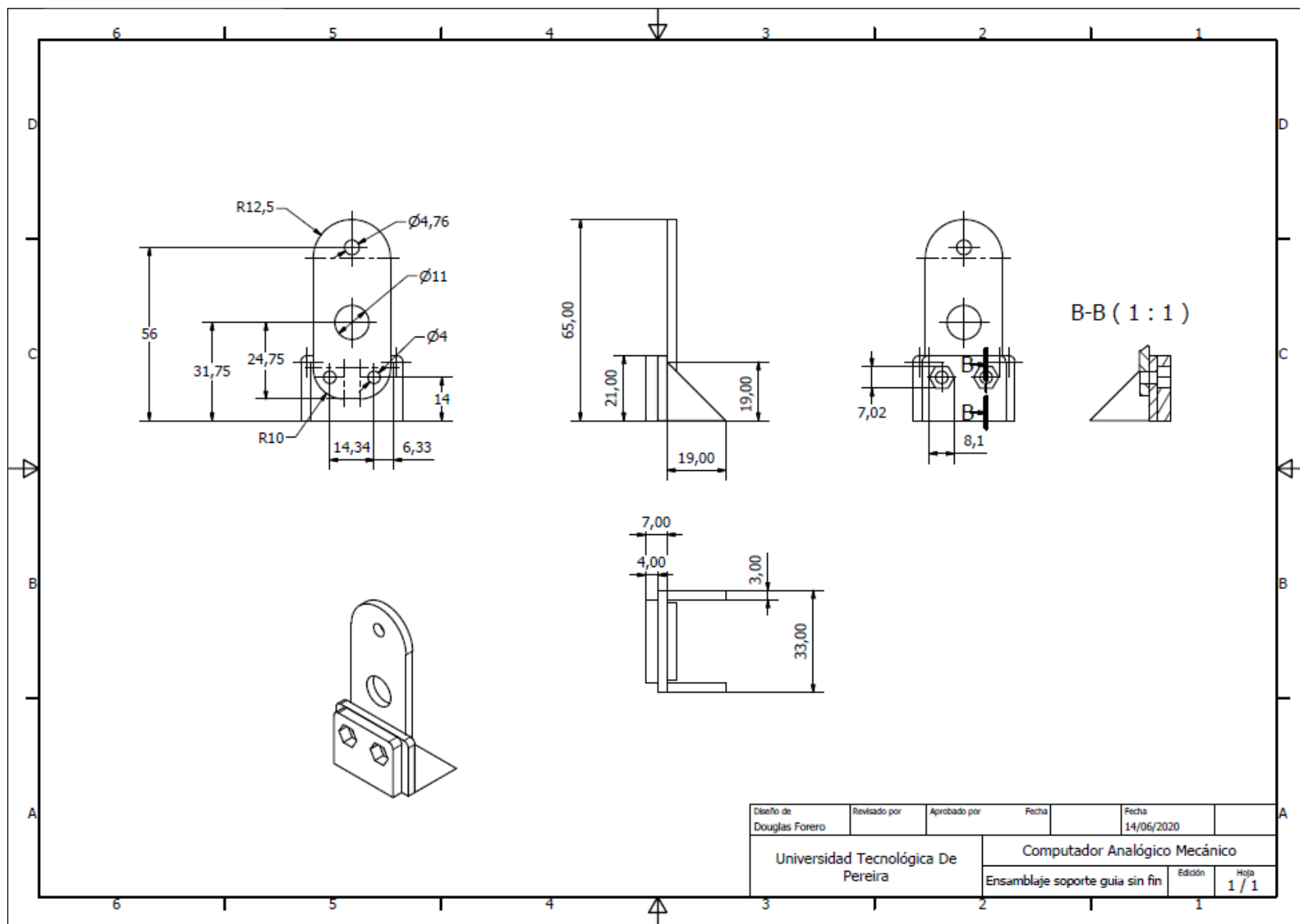


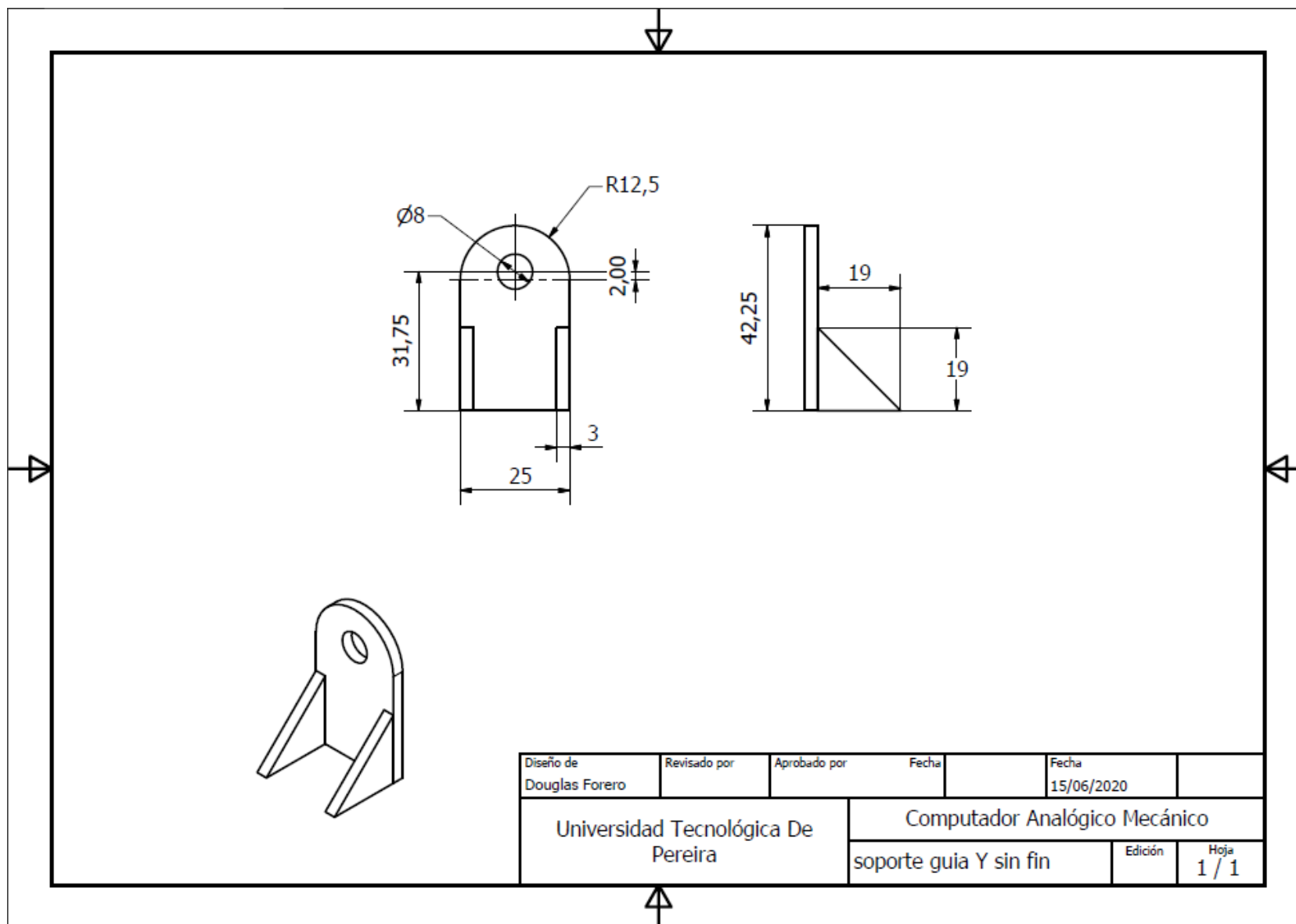


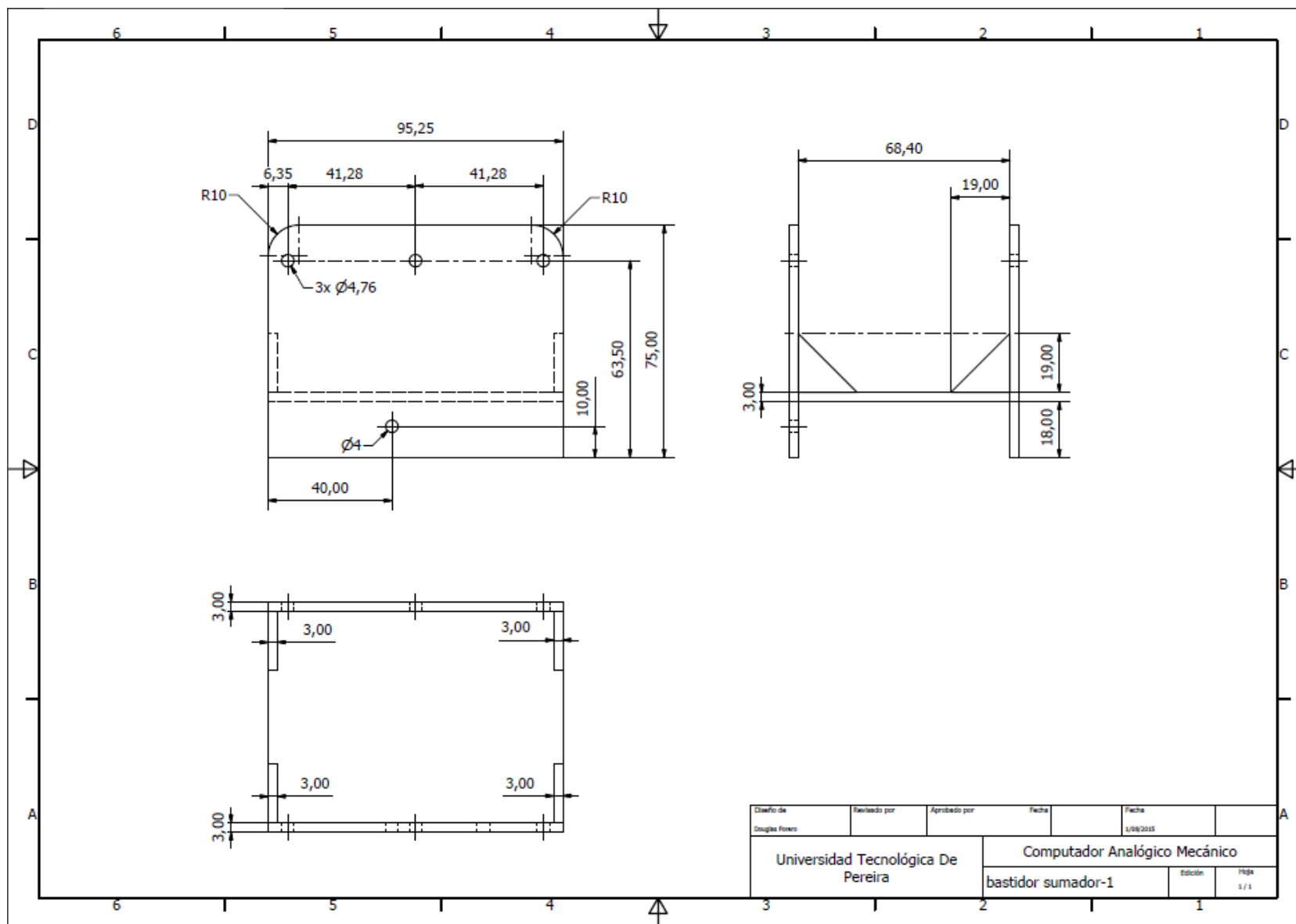


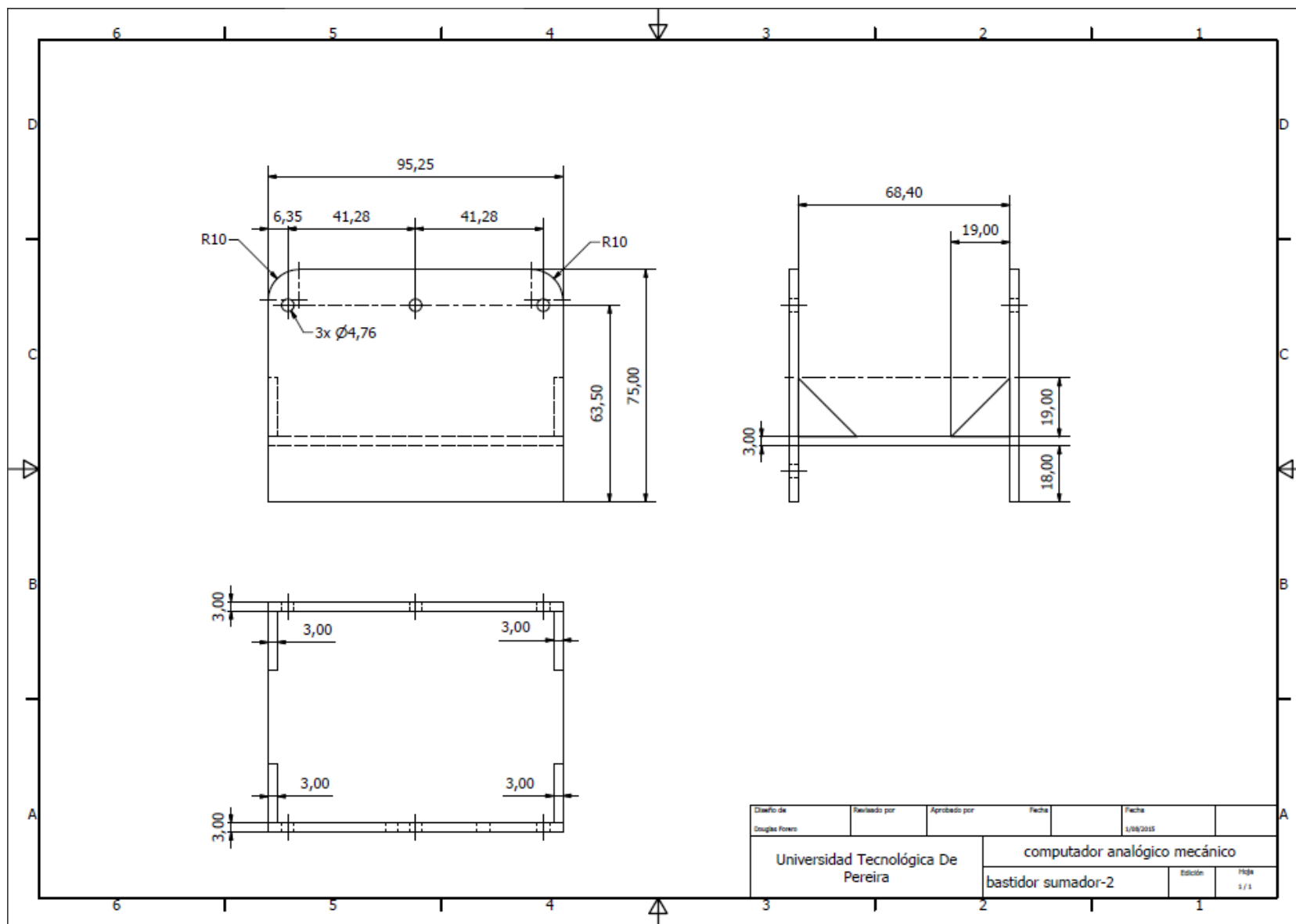


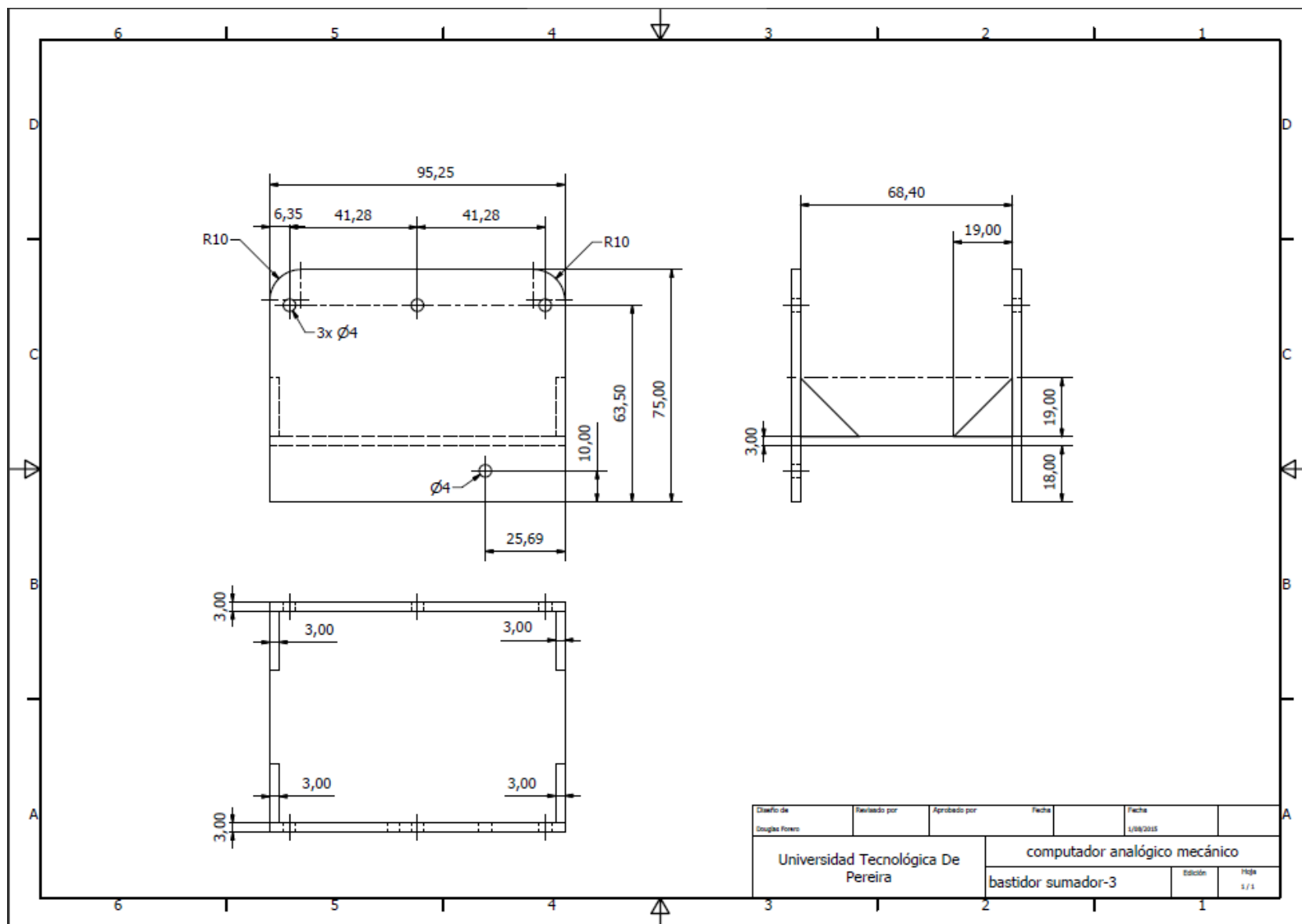




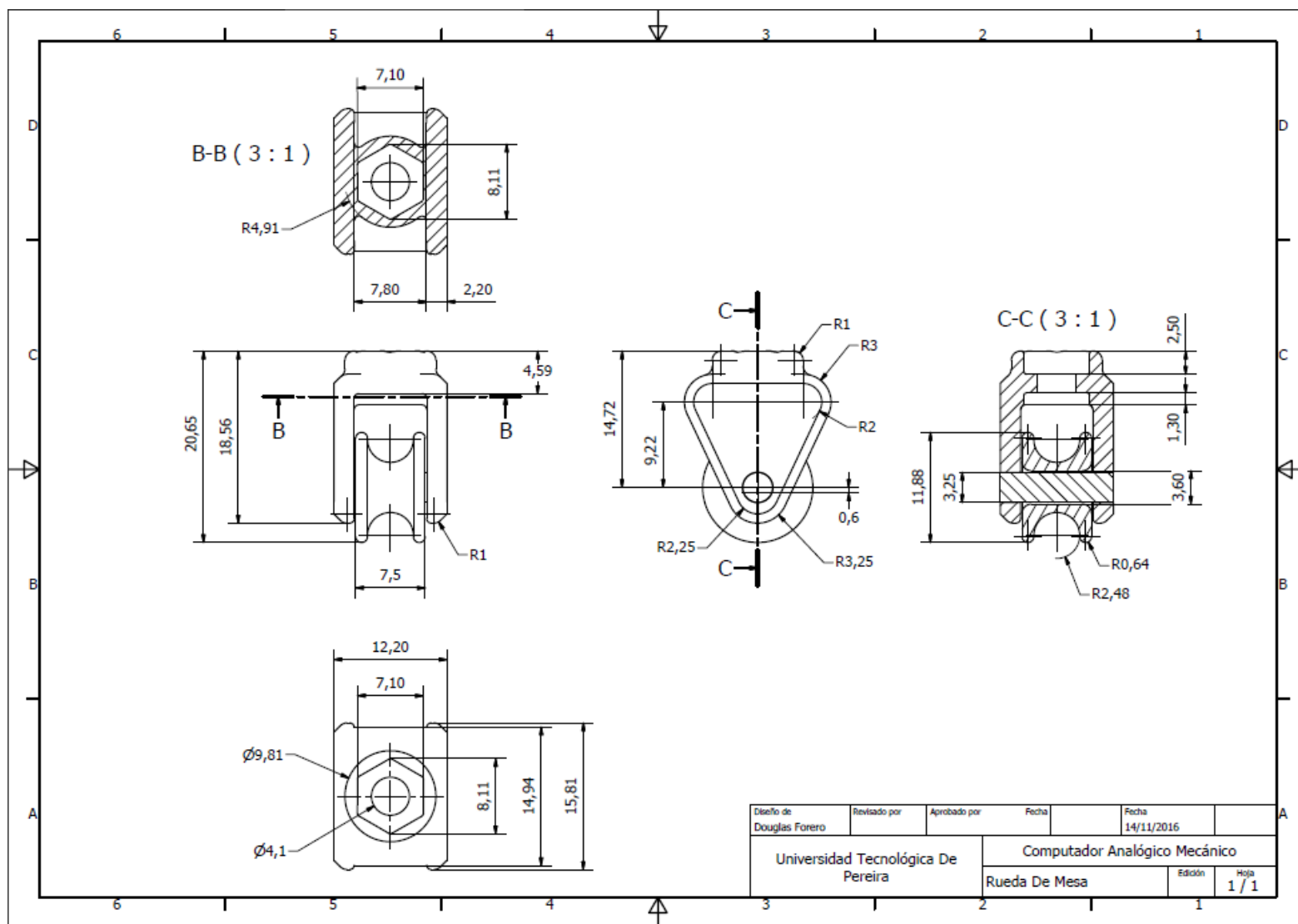


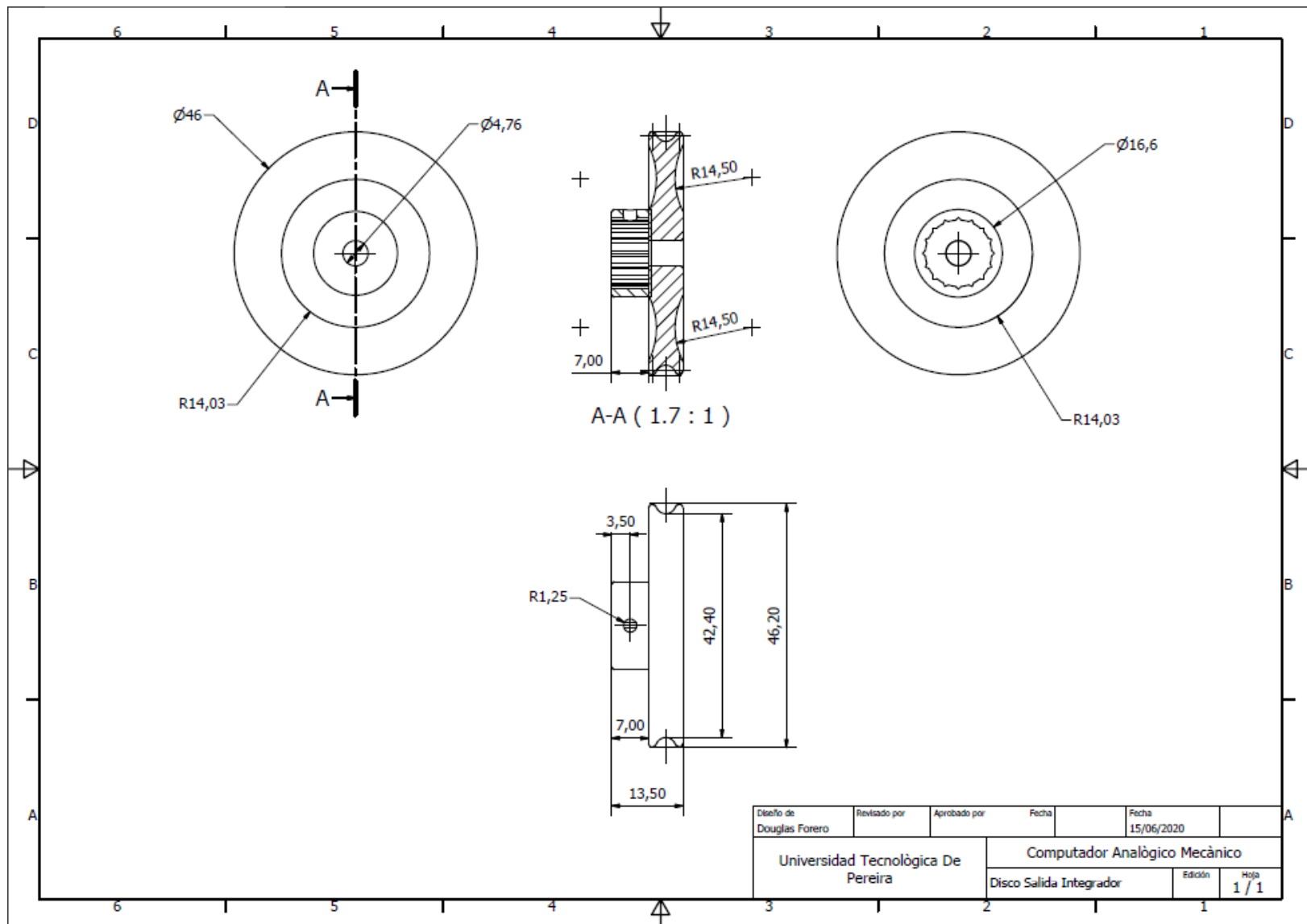


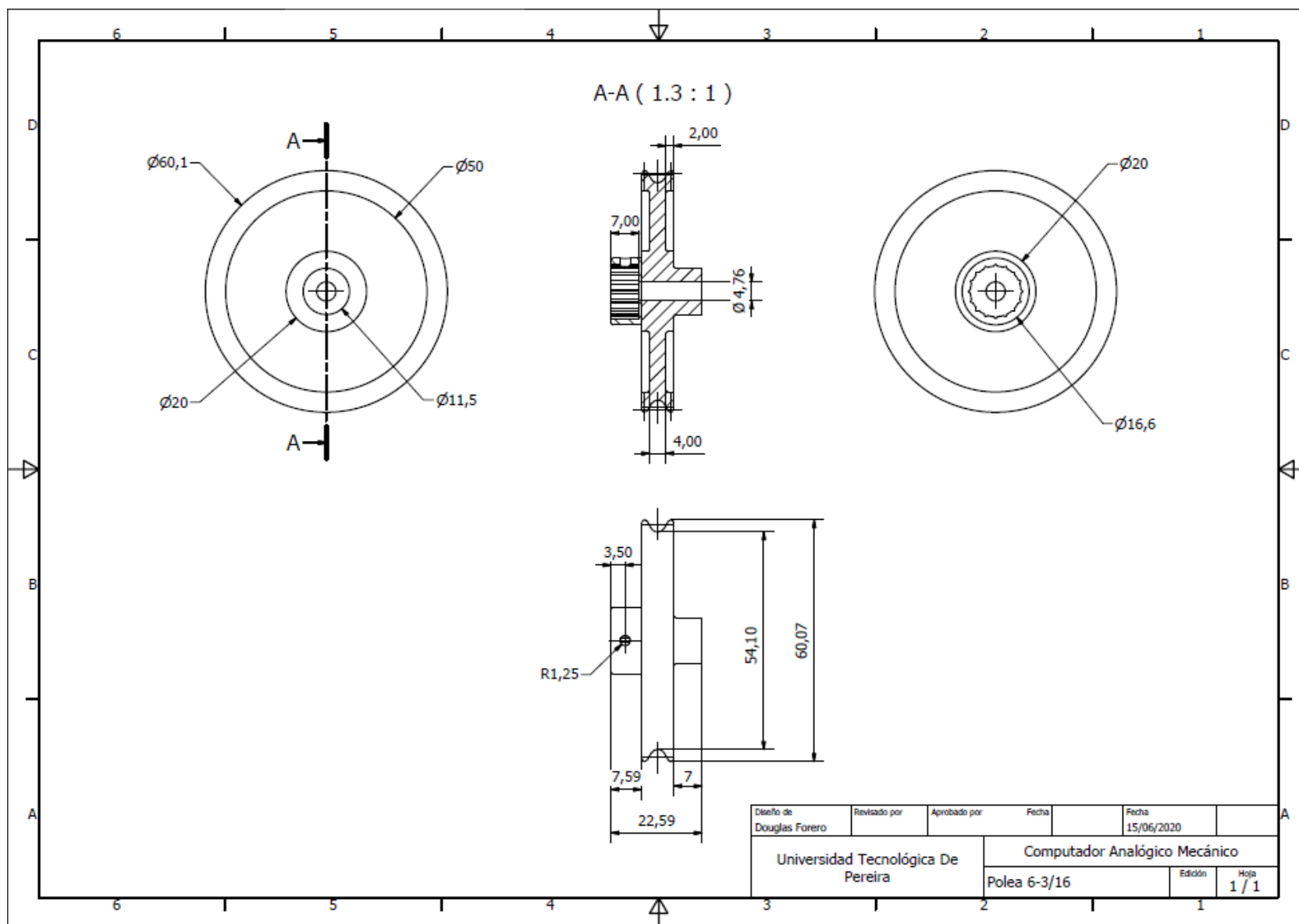


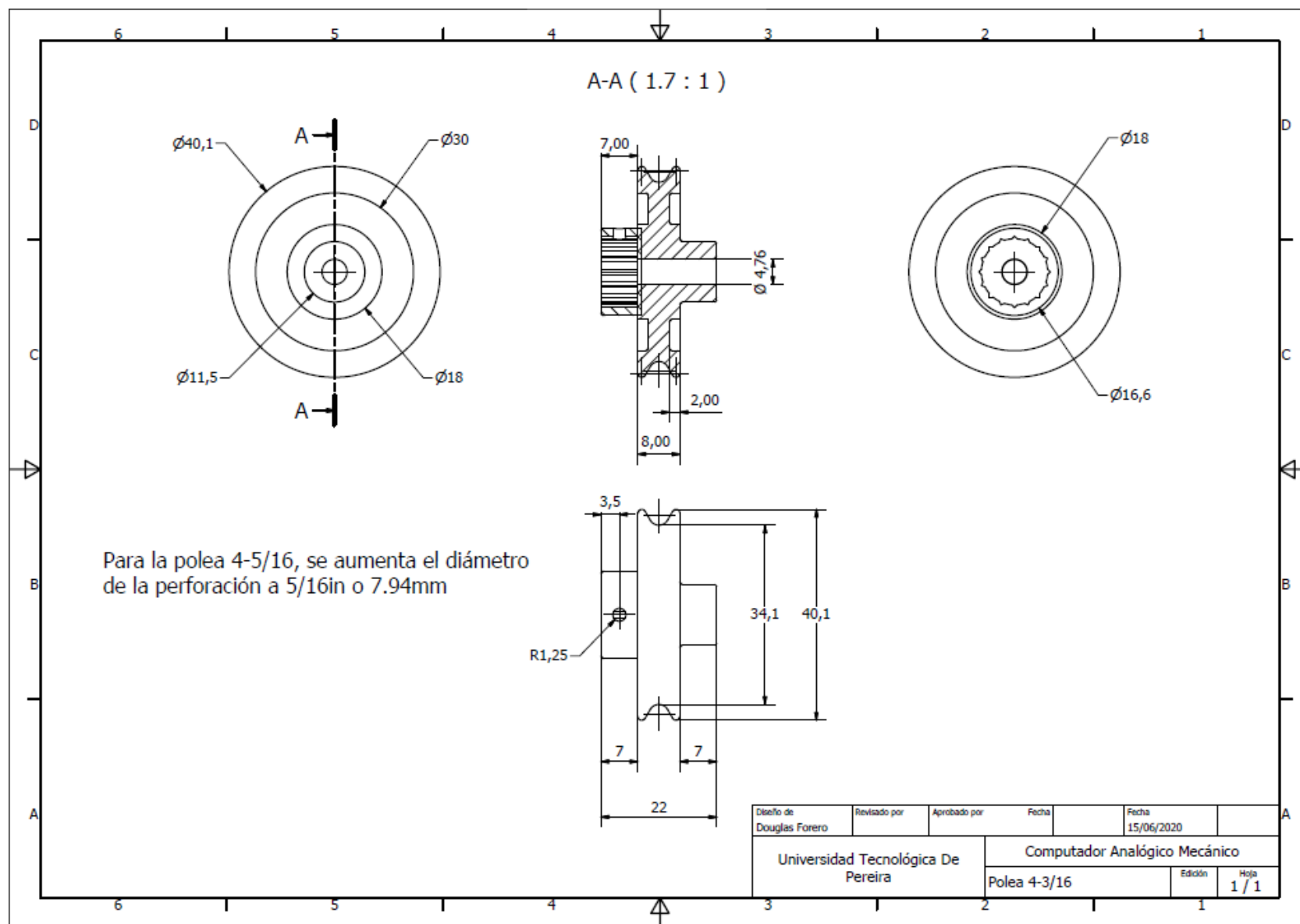


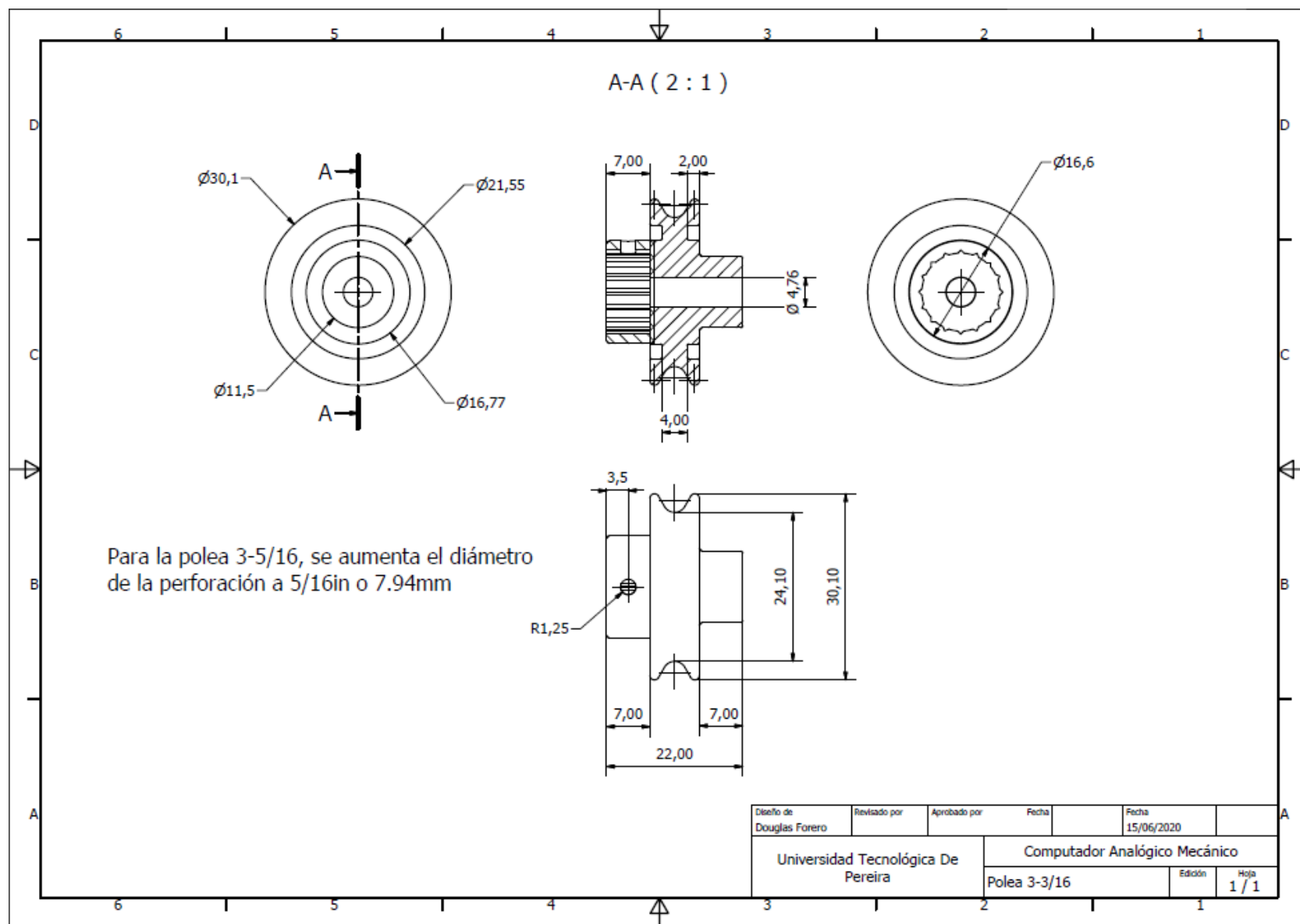
ANEXO B. PLANOS DE PIEZAS LOGRADAS POR IMPRESION 3D

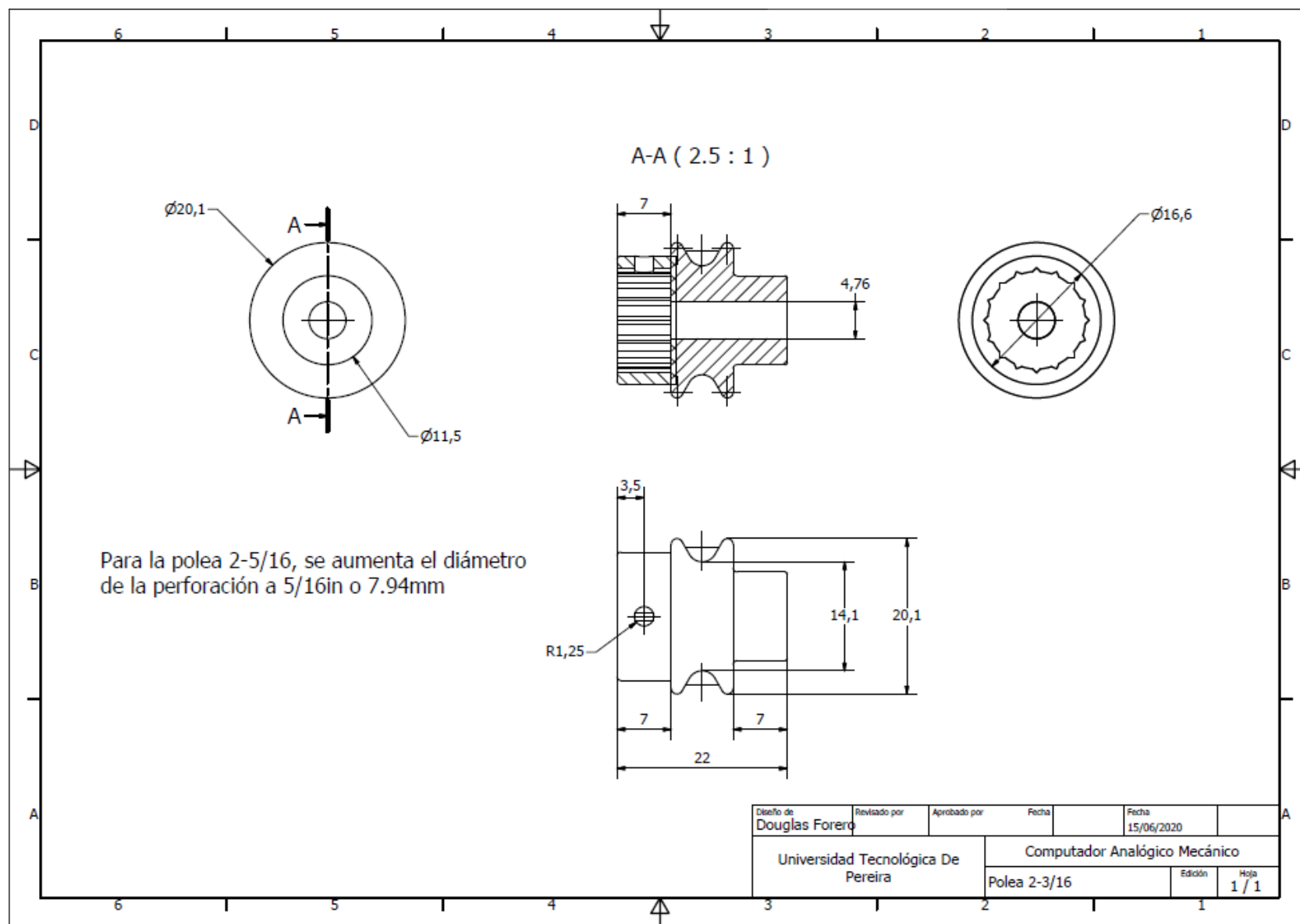


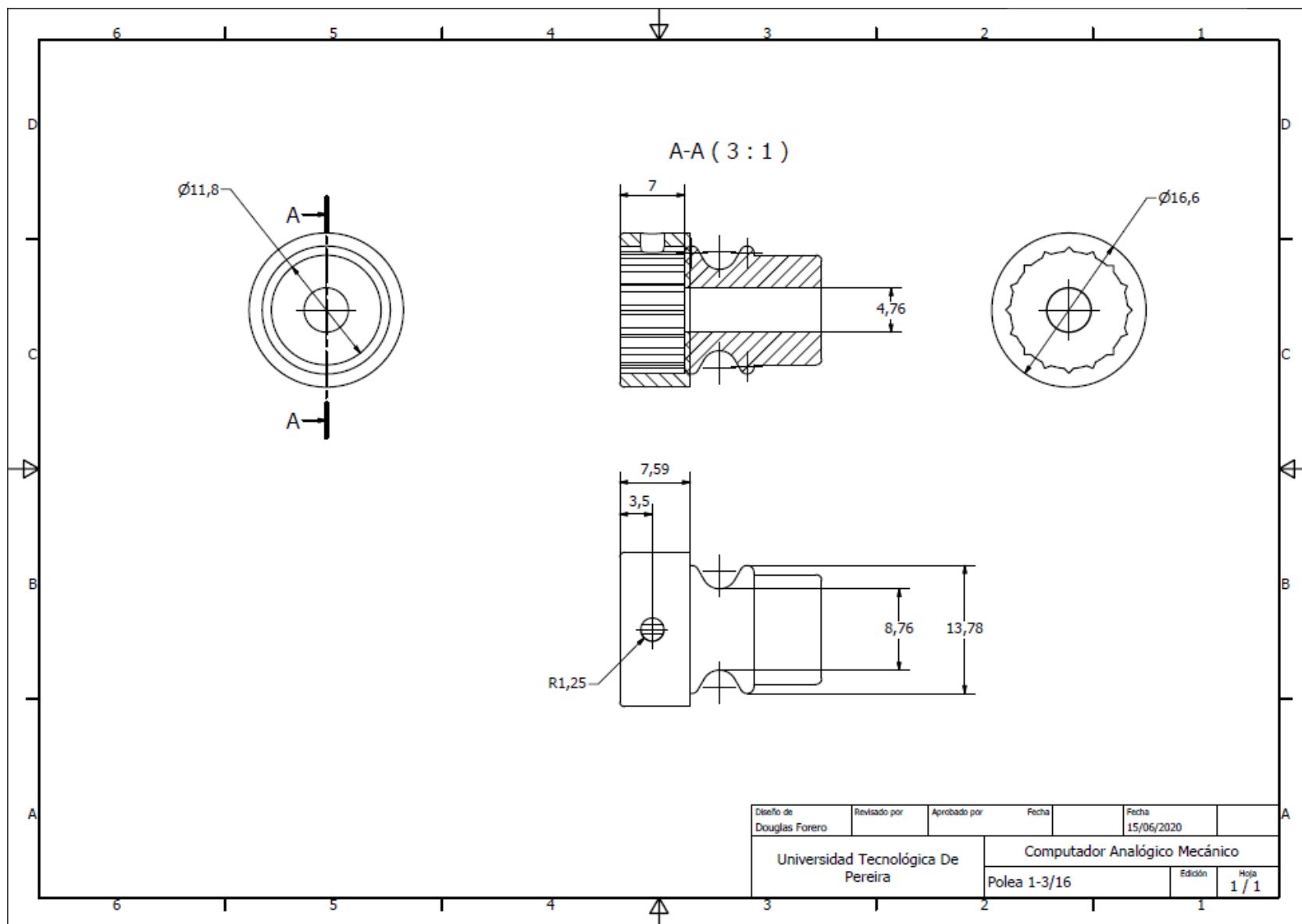


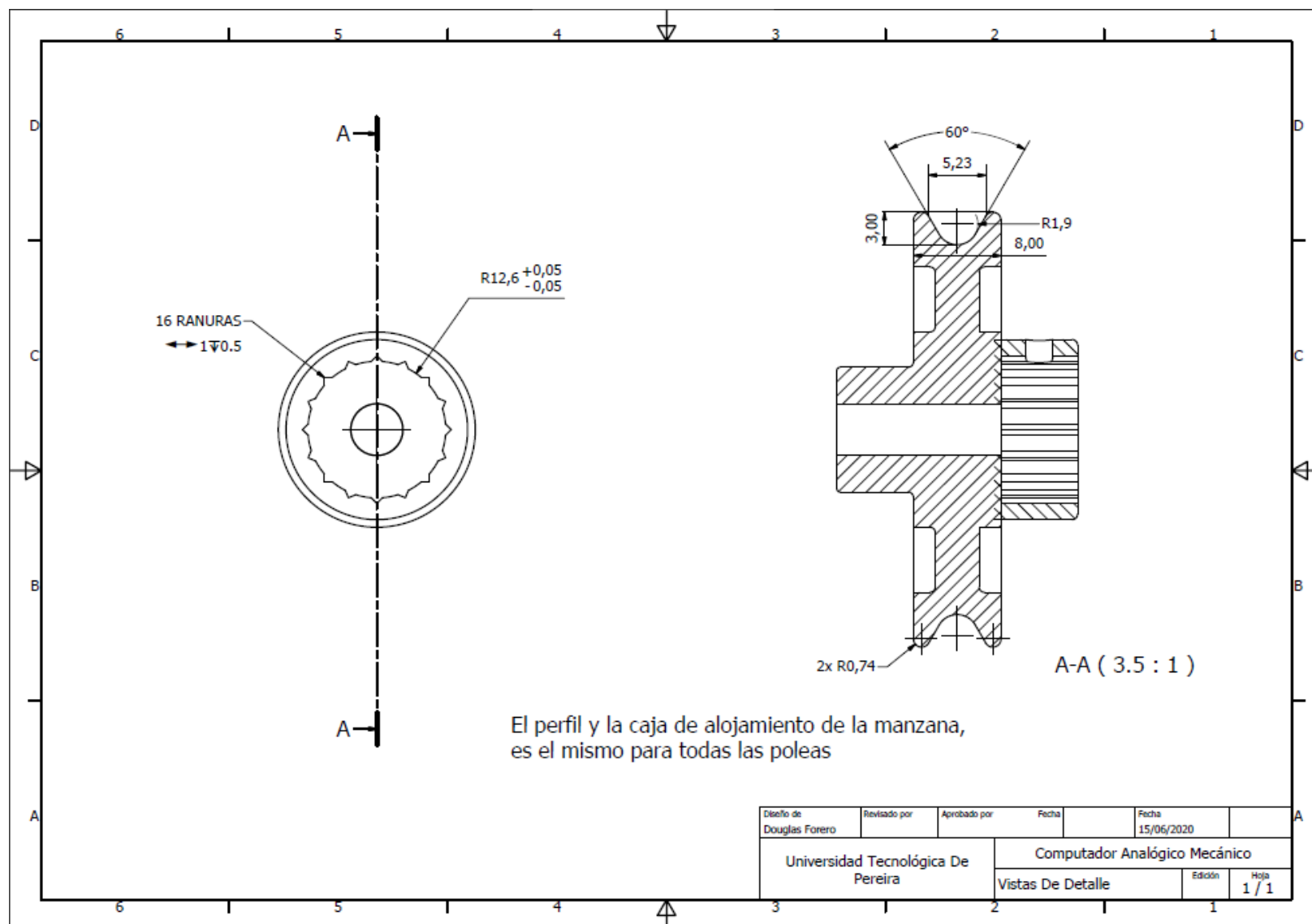


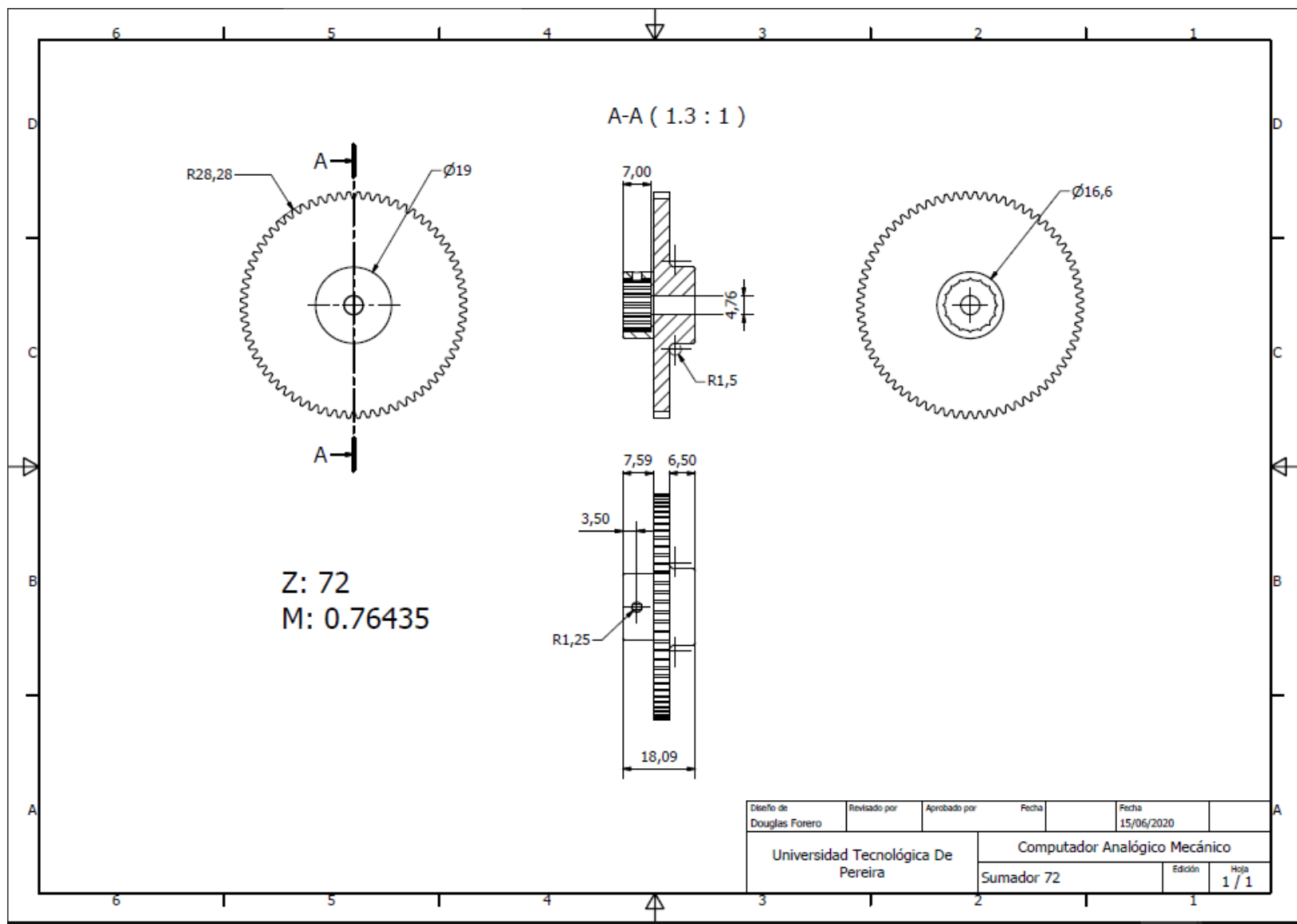


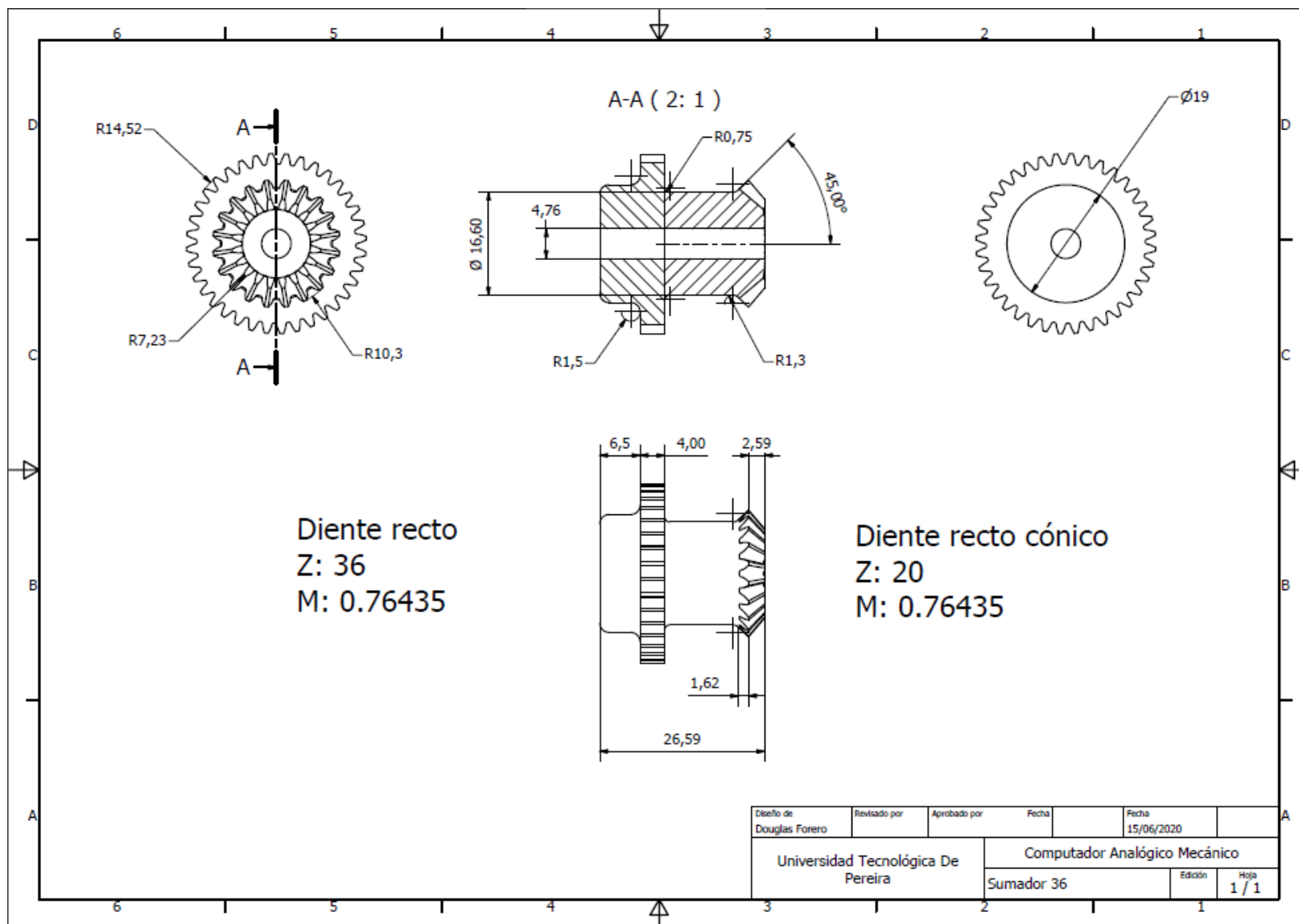


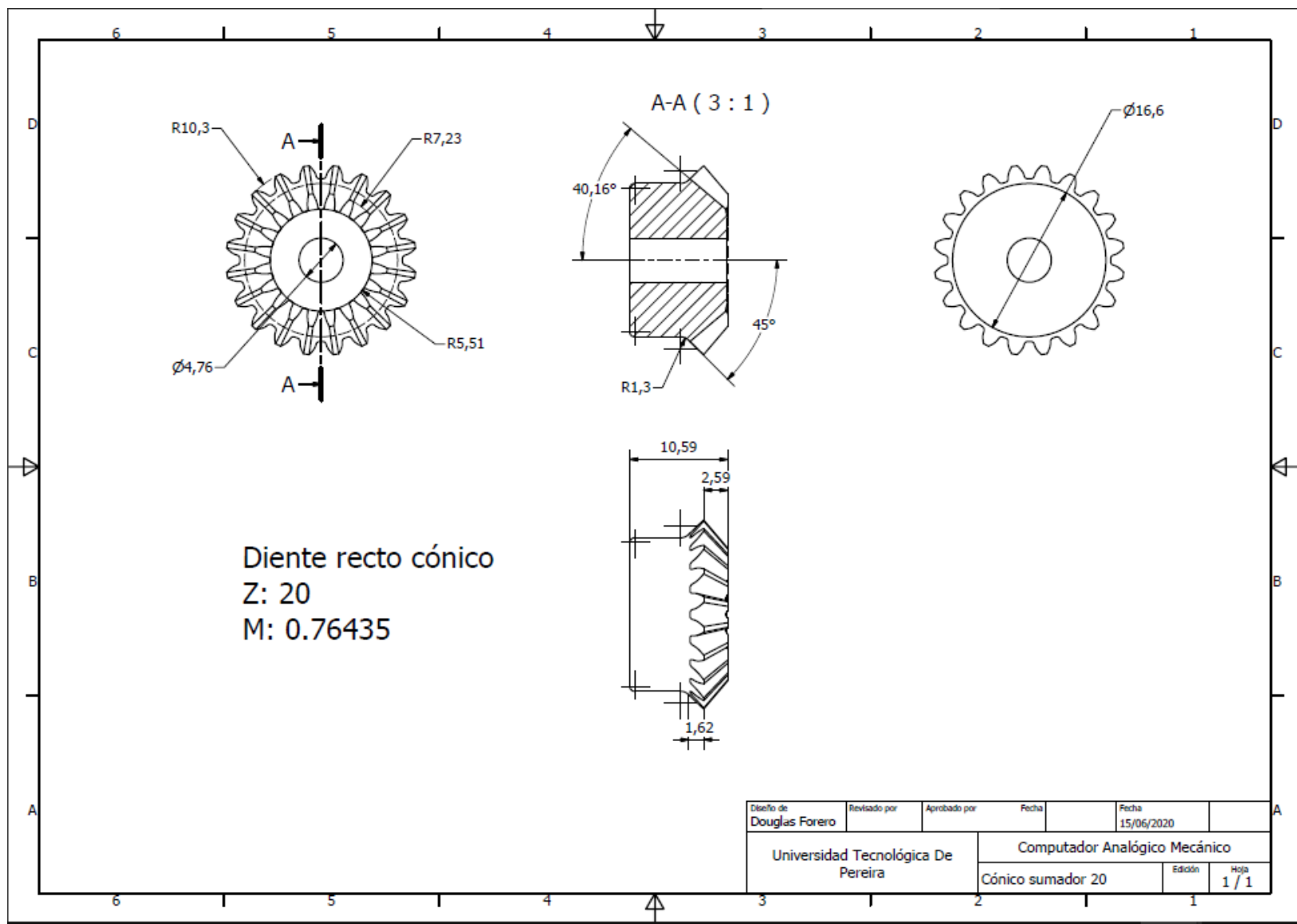


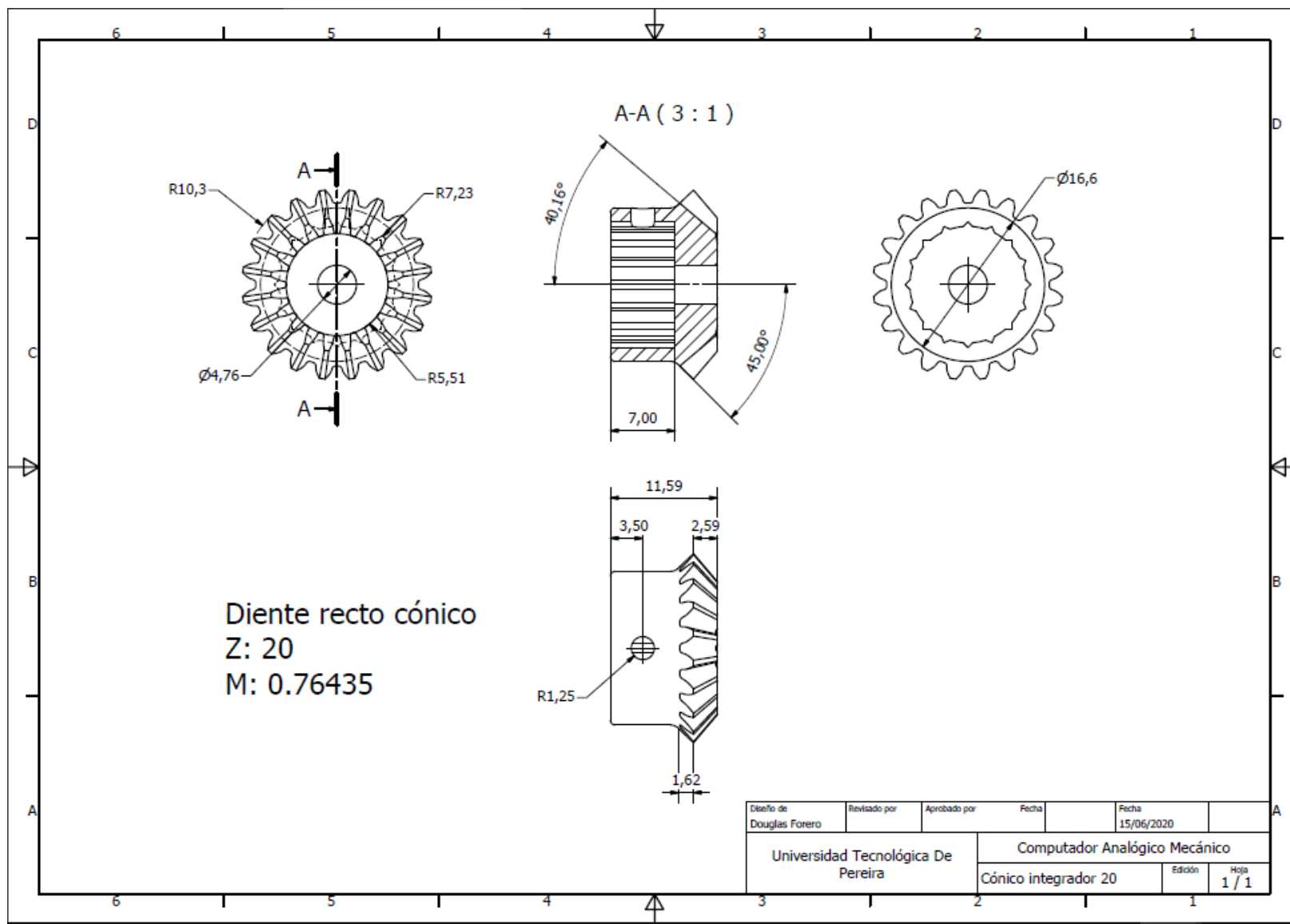


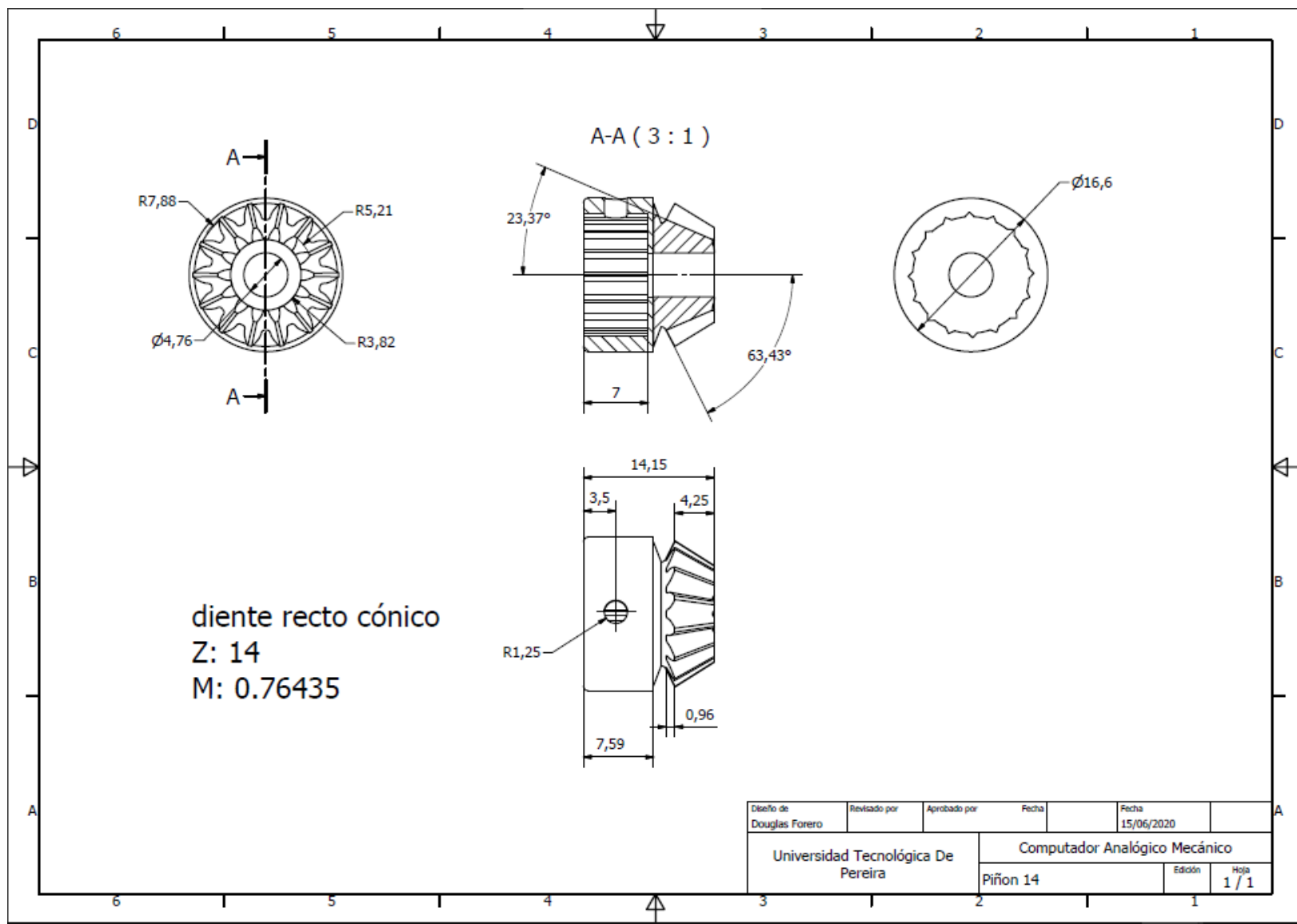


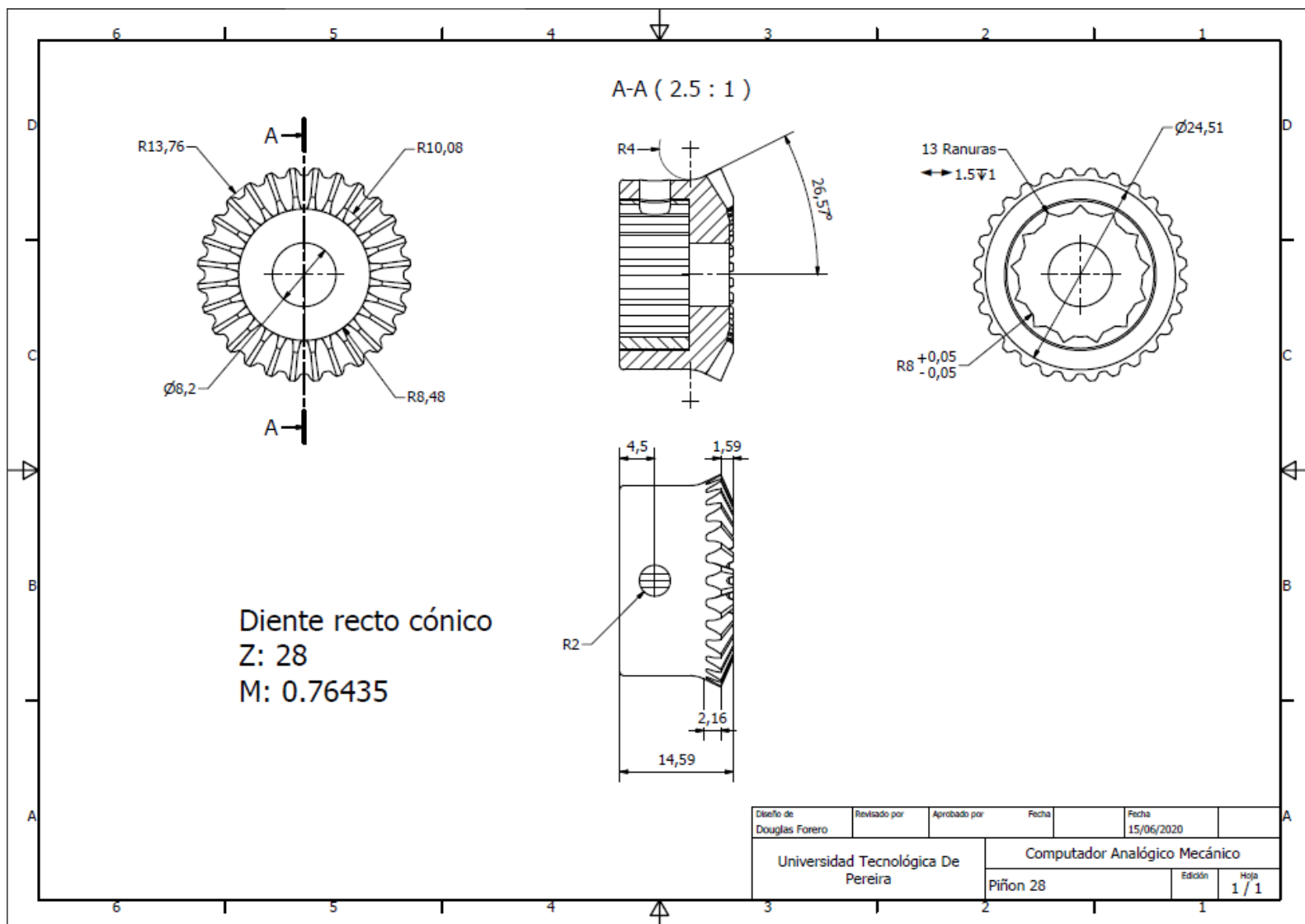


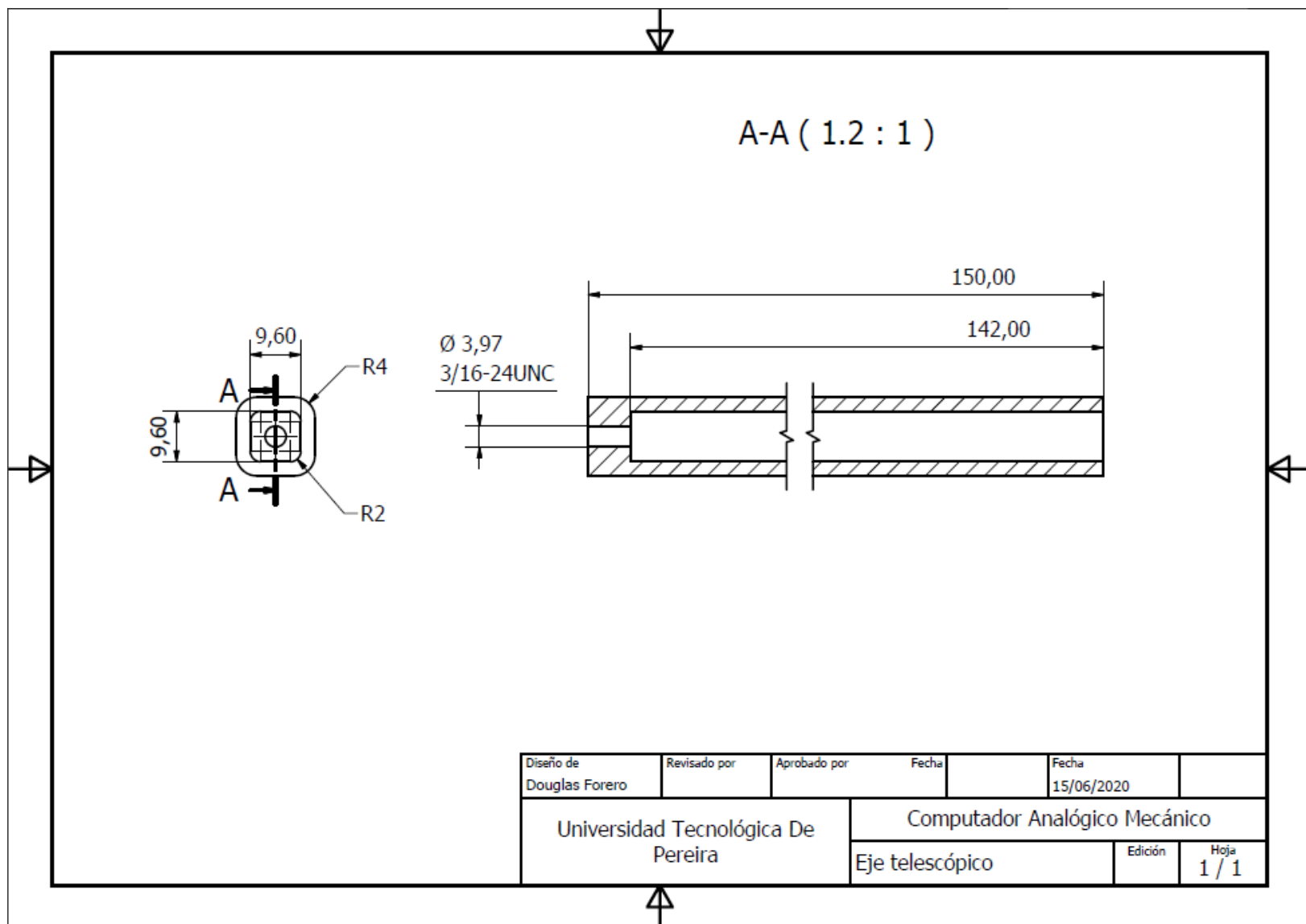


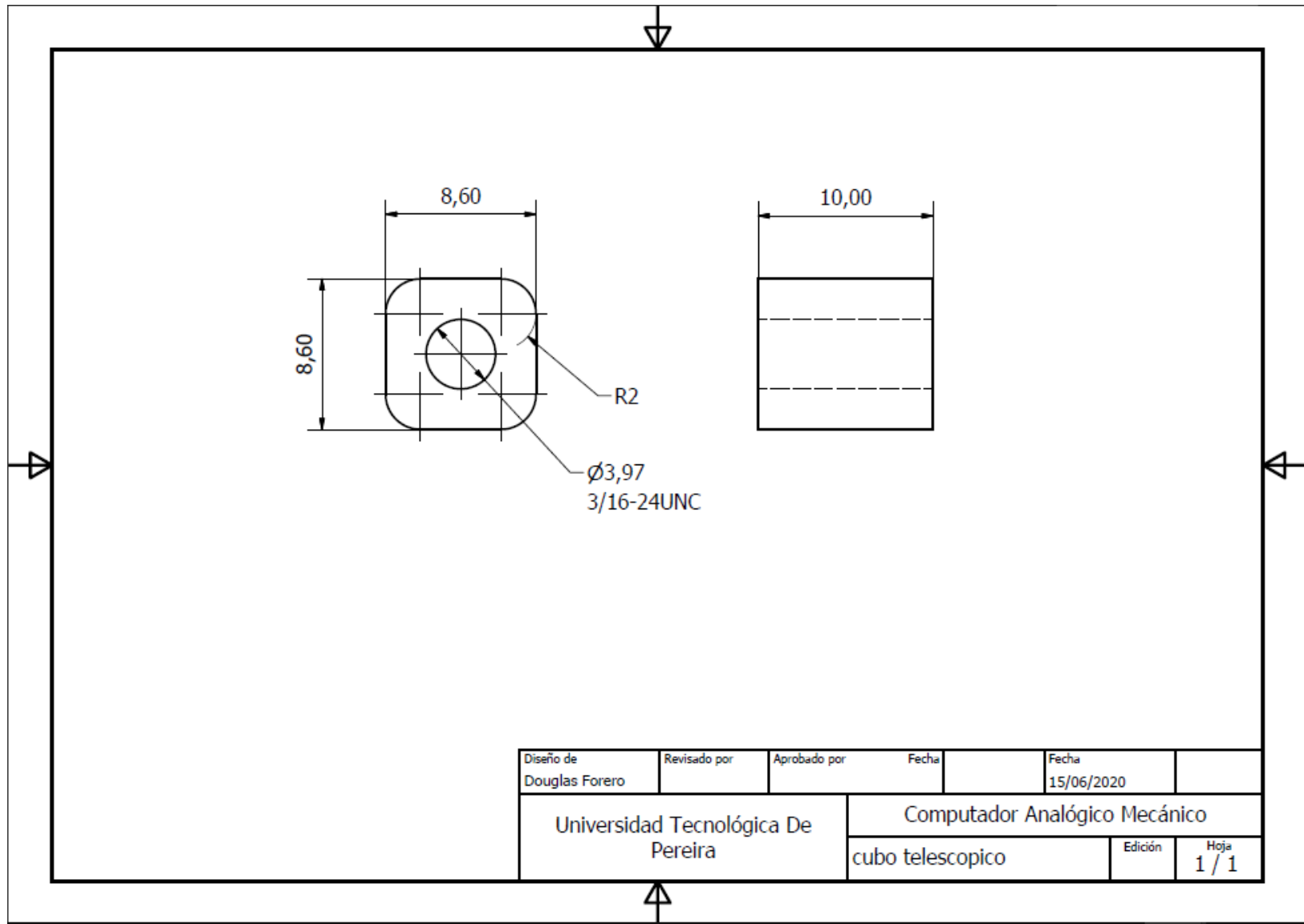




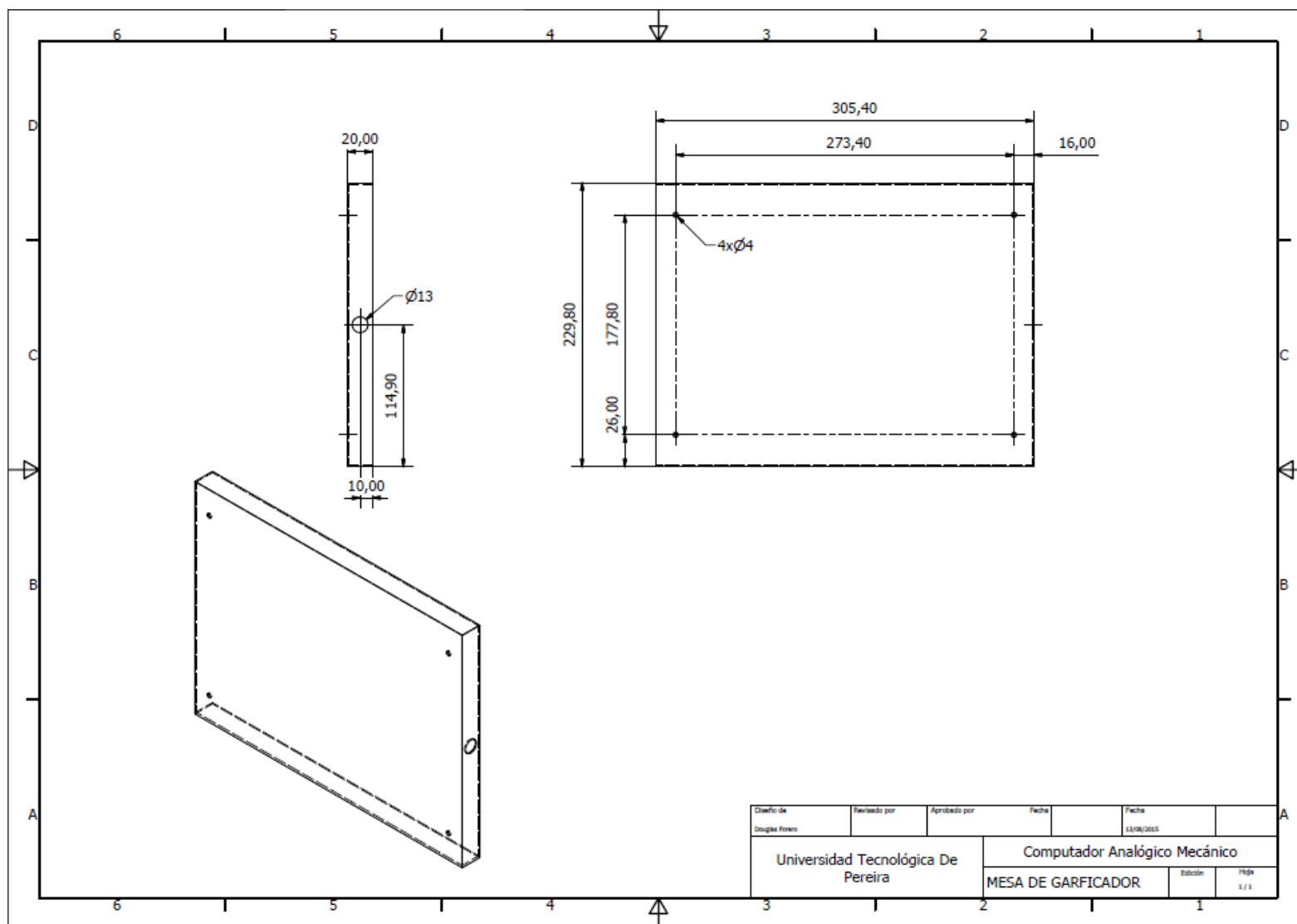


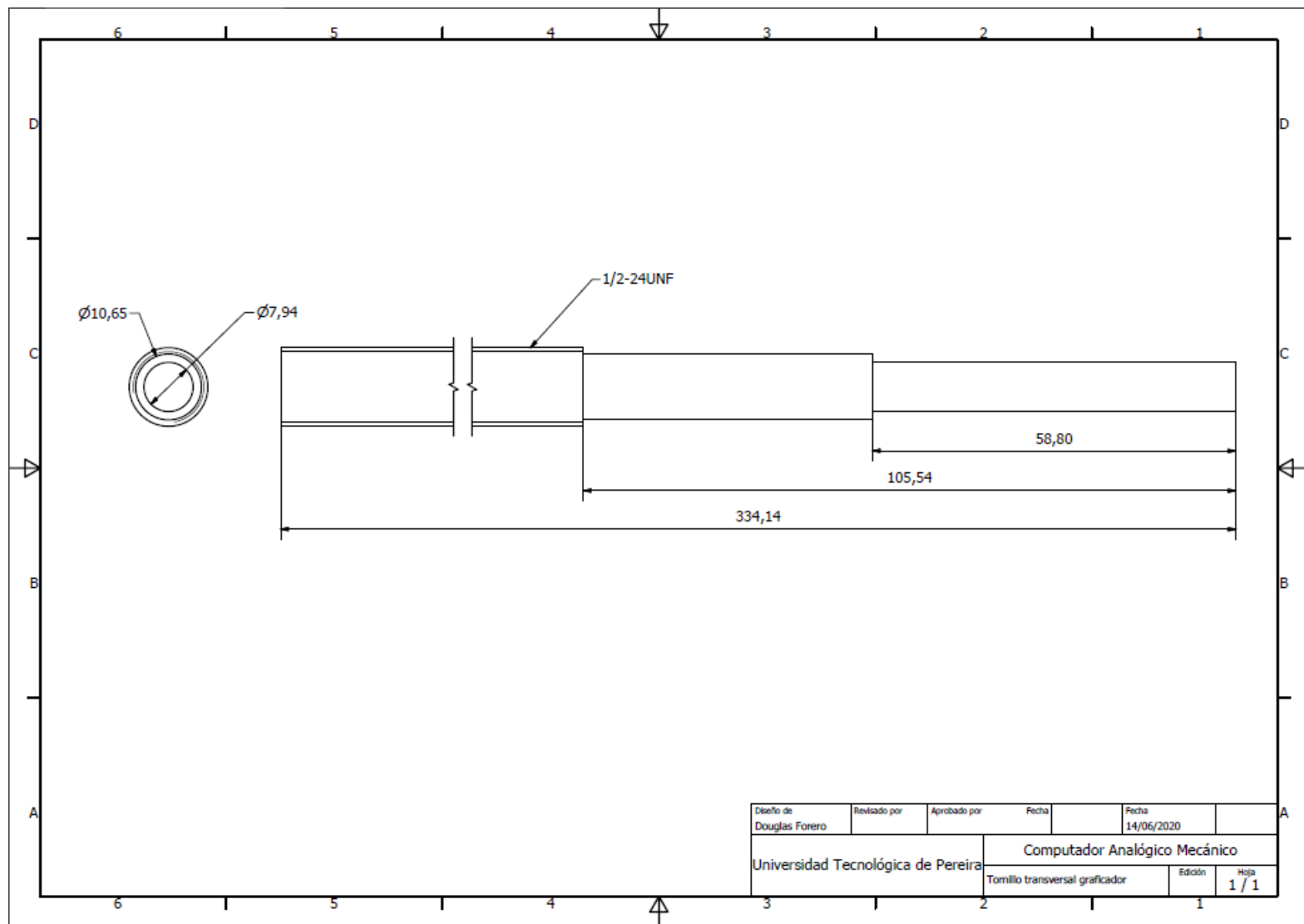


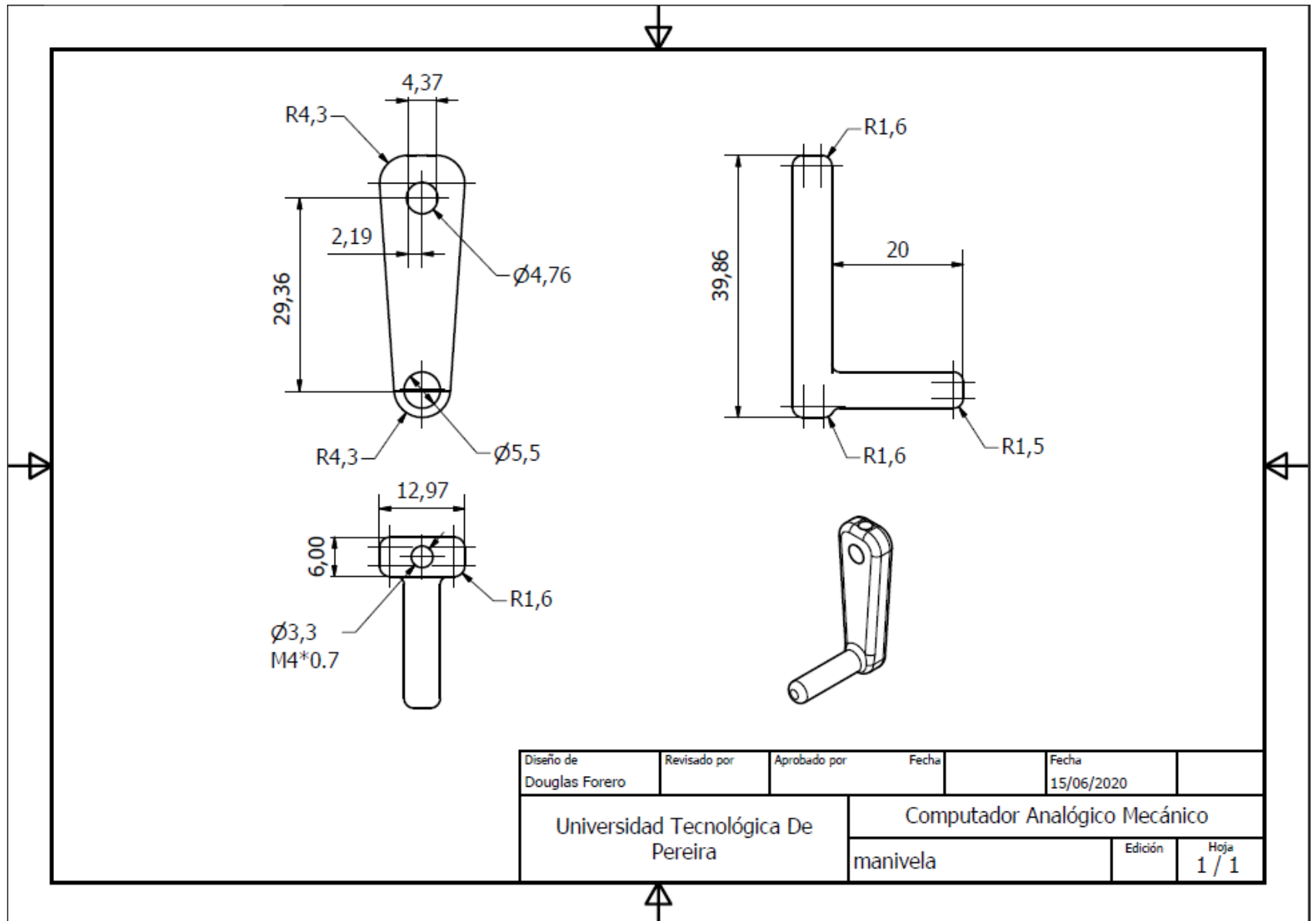


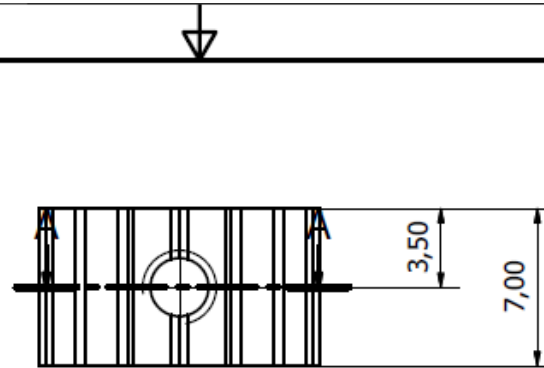


ANEXO C. PLANOS DE PIEZAS FABRICADAS POR PROCESOS DE MECANIZADO

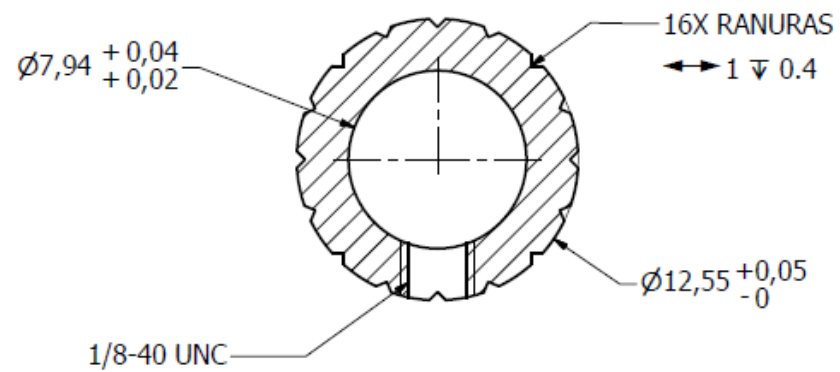








A-A (4 : 1)



Diseño de Douglas Forero	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 21/01/2019	
Universidad Tecnológica De Pereira			Computador Analógico Mecánico		
			MANZANA 5-16	Edición	Hoja 1 / 1

